

AUTOMATIZACIÓN DE MÁQUINA AHUELLADORA EN  
LABORATORIO DE PAVIMENTOS

Autores

EDWARD JAVIER CHAPARRO SOTO  
YEIXON IVÁN SÁNCHEZ QUINTERO

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA  
BOGOTÁ, D.C.  
2012

AUTOMATIZACIÓN DE MÁQUINA AHUELLADORA EN  
LABORATORIO DE PAVIMENTOS

Autores

EDWARD JAVIER CHAPARRO SOTO  
YEIXON IVÁN SÁNCHEZ QUINTERO

Trabajo de grado para optar el Título de  
Ingeniero en Mecatrónica

Director

Ing. Nelson Fernando Velasco Toledo M.Sc

Codirector

Ing. Oscar Javier Reyes Ortiz Ph.D

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA  
BOGOTÁ, D.C.  
2012

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C. 06 de Noviembre de 2012

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado primeramente a mi padre Mario Chaparro, porque el desde el cielo me dio la confianza y sabiduría para salir a delante en este proceso tan importante en mi vida, a mi madre María Paulina que con su dedicación, esfuerzo y apoyo siempre estuvo a mi lado acompañándome y viendo como mi sueño se hacia realidad, también agradezco a mis hermanas Karen Andrea y Paula Lorena por su amor y alegría brindados.

Edward Javier Chaparro Soto

Dedico este trabajo de grado, a Dios por darme la energía espiritual para lograr cada meta propuesta, a mi padre Pablo Antonio Sánchez, mi madre Celmira Quintero, por poner en mí la confianza y brindarme la oportunidad de ser profesional, también por su infinito esfuerzo y amor, a mi hermano Robert Sánchez por su gran apoyo y cariño.

Yeixon Iván Sánchez Quintero

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su profundo agradecimiento en primer lugar a Dios por darnos la fortaleza para culminar este gran logro en nuestras vidas, por que gracias a Él fue posible desarrollar y finalizar nuestro proyecto de grado.

A Nelson Fernando Velasco Toledo y Oscar Javier Reyes Ortiz, docentes de la Universidad Militar Nueva Granada, por la dedicación y apoyo brindado, por sus sugerencias, ideas y sus valiosos aportes, que fueron de gran ayuda para el desarrollo de este proyecto, también a German Leandro Vargas auxiliar de investigación, por ser un excelente guía y brindarnos su conocimiento en el transcurso del proyecto.

A los docentes del programa de Ingeniería Mecatrónica que con sus enseñanzas nos brindaron unas bases solidas para formar nuestro conocimiento como ingenieros.

A nuestros amigos y compañeros de carrera por que siempre estuvieron a nuestro lado compartiendo experiencias gratificantes, brindándonos su confianza y amistad durante estos años.

Y a todas las personas que con su colaboración y apoyo fueron importantes para la realización de este proyecto, hacemos extensivo nuestros más sinceros agradecimientos.

# Índice General

---

Introducción.....	1
Objetivos .....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos .....	2
Alcances y delimitaciones .....	2
1 Ensayo para la medición de la resistencia a la deformación plástica.....	3
1.1 Mezclas asfálticas en caliente .....	3
1.2 Fallas en los pavimentos .....	3
1.3 Equipos desarrollados para medir la deformación plástica.....	4
1.4 Norma colombiana del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) .....	7
1.5 Automatización de máquina ahuelladora de la Universidad Militar Nueva Granada .....	8
1.5.1 Instrumentación y sensórica de la máquina ahuelladora .....	9
1.5.2 Actuadores de la máquina ahuelladora .....	10
1.5.3 Control y adquisición de datos.....	11
2 Puesta en funcionamiento .....	12
2.1 Descripción de la máquina ahuelladora.....	12
2.1.1 Transmisión de movimiento .....	13
2.1.2 Bastidor .....	15
2.1.3 Sistema neumático.....	16
2.1.4 Actuadores y sistemas de control .....	17
2.2 Estado Inicial de la Máquina Ahuelladora.....	19
2.2.1 Transmisión de movimiento .....	19
2.2.2 Bastidor .....	20
2.2.3 Aislamiento térmico.....	21
2.2.4 Motor Trifásico.....	22
2.2.5 Variador de Velocidad.....	22
2.2.6 Cilindros neumáticos.....	22
2.3 Intervención y puesta en funcionamiento de la máquina ahuelladora.....	29

2.3.1 Transmisión de movimiento .....	30
2.3.2 Bastidor .....	31
2.3.3 Aislamiento Térmico .....	33
2.3.4 Motor Trifásico.....	34
2.3.5 Variador de Velocidad.....	34
2.3.6 Cilindros neumáticos.....	36
2.4 Procesos de fabricación .....	39
2.4.1 Fabricación del diseño propuesto.....	39
3 Automatización de máquina ahuelladora.....	42
3.1 Nivel I pirámide de automatización .....	42
3.1.1 Mecanismos .....	42
3.1.2 Instrumentación.....	48
3.1.3 Media tensión .....	53
3.1.4 Baja tensión.....	55
3.2 Nivel II pirámide de automatización .....	59
3.2.1 Control sistema de temperatura.....	60
3.2.2 Control sistema de velocidad.....	61
3.2.3 Control sistema neumático .....	65
3.2.4 Interfaz Usuario-Máquina .....	67
4 Trabajos Futuros .....	72
Conclusiones .....	76
Bibliografía .....	78
Anexos.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

# Índice de Figuras

---

Figura 1. Georgia Loaded Wheel Tester [7].	4
Figura 2. Equipo para ensayo de Pista de Laboratorio. [9]	5
Figura 3. Asphalt Pavement Analyzer [11].	5
Figura 4. Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD). [13]	6
Figura 5. Purdue University Laboratory Wheel-Tracking Device. [15]	6
Figura 6. fhwa.dot, Asphalt Pavement Technology.	7
Figura 7. Model Mobile Load Simulator (MMLS3). [18]	7
Figura 8. Pirámide de proceso de automatización.	9
Figura 9. Elementos de un lazo cerrado de control.	11
Figura 10. CAD de la máquina ahuelladora.	12
Figura 11. Sistema de transmisión de movimiento de la máquina ahuelladora.	13
Figura 12. Sistema de prensas y rodamientos que permiten el movimiento lineal.	14
Figura 13. Acople flexible tipo araña usado para la transmisión de movimiento.	14
Figura 14. Platina transmisión de movimiento, rodamientos de sujeción y guías de bronce.	15
Figura 15. Vista isométrica de la estructura metálica de la máquina.	15
Figura 16. Ubicación de la fibra de vidrio usada como aislante de calor.	16
Figura 17. Modelo en CAD del sistema neumático con el que cuenta el ahuellador.	17
Figura 18. Variador de velocidad Yaskawa.	17
Figura 19. Resistencias eléctricas ubicadas dentro del habitáculo para generar calor. [1]	18
Figura 20. Control de temperatura Shimaden SR1.	18
Figura 21. Acople flexible tipo araña, desgaste.	19
Figura 22. Daños a piezas. a) Rodamientos dañados. b) Guías de bronce desgaste por fricción.	20
Figura 23. Diseño CAD del bastidor	20
Figura 24. Resultados del estudio de análisis de elementos finitos. Nótese la deformación en la parte donde están situados los cilindros neumáticos.	21
Figura 25. Ubicación de las resistencias dentro del horno, se puede observar el desgaste de las láminas producto por las altas temperaturas de las resistencias.	22
Figura 26. Fuerza lineal y velocidad lineal, con radio 120mm.	24
Figura 27. Vástagos dañados. Nótese la falla por fatiga.	25
Figura 28. Cilindro unido a sistema de ahuellamiento. Estado en que se encuentra el vástago al inicio del proyecto.	26
Figura 29. FEM Von Mises cilindro sin refuerzos (Vista Frontal).	26
Figura 30. FEM Von Mises cilindro sin refuerzos (Acercamiento).	27
Figura 31. FEM Ures cilindro sin refuerzos (Vista Frontal).	27
Figura 32. FEM Ures cilindro sin refuerzos (Acercamiento).	28
Figura 33. FEM ESTRN cilindro sin refuerzos (Vista Frontal).	28
Figura 34. FEM ESTRN cilindro sin refuerzos (Acercamiento).	29



Figura 35. Modificación excéntrica, con radio de 140mm.....	30
Figura 36.Cálculos de movimiento de la prensas con respecto a las llantas. ....	30
Figura 37. Acople flexible tipo araña. Detállese bien el nuevo acople y el proceso para poner los nuevos prisioneros.....	31
Figura 38.Estructura reforzada. Comparación del diseño en CAD y como quedo en realidad, las partes señaladas en azul en el modelo de CAD son los refuerzos. ....	32
Figura 39. Análisis de elementos finitos a la parte superior del bastidor.....	32
Figura 40. Revestimiento de Asbestos para evitar quemar las láminas del interior. ....	34
Figura 41. Conexión triangulo. ....	34
Figura 42.Configuración variador [24]. ....	35
Figura 43. Estructura con los refuerzos propuestos. ....	36
Figura 44. Render del modelo en CAD del buje propuesto. ....	37
Figura 45. Render del modelo en CAD de la barra de acero plata.....	37
Figura 46. Render del modelo en CAD de las platinas de sujeción de los cilindros neumáticos. ....	38
Figura 47. Render del modelo en CAD de ensamble mecánico que une la rueda con el vástago....	38
Figura 48. Bujes reales. ....	40
Figura 49. Barras de acero plata. Mecanizado de roscado y redondeo. ....	40
Figura 50. Proceso de fabricación asistida por computador de las platinas de los cilindros neumáticos.....	41
Figura 51. Proceso de rectificación de las platinas en maquinaria convencional.....	41
Figura 52. Diagrama en Proteus de la conexión de las resistencias. ....	43
Figura 53. Actuador neumático doble efecto, la figura muestra la dirección de la fuerza y el área en donde es aplicada la presión.....	46
Figura 54. Conexión en serie de termocuplas tipo J. ....	48
Figura 55. Modelo en CAD del sensor lineal HS25.....	51
Figura 56. Conexiones y elementos del tablero eléctrico de la máquina ahuelladora.....	54
Figura 57. Máquina con elementos de seguridad, botón de paro de emergencia y baliza.....	55
Figura 58. Esquema electrónico del sensor de efecto hall con el filtro pasa-bajo. ....	58
Figura 59. Etapa de acondicionamiento del sensor de presión.....	59
Figura 60. Respuesta a una entrada escalón. a) 1er orden. b) 2do orden.....	60
Figura 61. a) Seguimiento del modelo a los datos cargados, b) Respuesta a una entrada escalón. ....	61
Figura 62. Diagrama de bloques, control de temperatura. ....	61
Figura 63. a) Señal de salida, PPM prensas. b) Señal de entrada, valor de PWM. ....	62
Figura 64. Forma de la respuesta a una entrada escalón, tomada de la identificación. ....	63
Figura 65. Gráfica de respuesta, calculando los parámetros de Ziegler-Nichols.....	64
Figura 66. u1) Entrada al sistema (PWM). y1) Salida del sistema (V). ....	65
Figura 67. Respuesta a un escalón, a) 1er Orden. b) 2do Orden.....	66
Figura 68. Salida modelo aproximado. ....	67
Figura 69. Gráfica de respuesta, calculando los parámetros de Ziegler-Nichols.....	67
Figura 70. Módulos VISA comunicación serial RS232, tomados de LabView 2012. ....	68

Figura 71. Diagrama de bloques comunicación serial. ....	68
Figura 72. Módulos I/O File de LabView, usados para guardar los datos.....	69
Figura 73. Diagrama de bloques, guardar datos en un archivo de texto.....	69
Figura 74. Panel del ensayo de ahuellamiento. ....	70
Figura 75. Panel de variables de control.....	70
Figura 76. Panel configuración y graficas de presión, temperatura y PPM. ....	71
Figura 77. Dimensiones de la tercera prensa.....	73
Figura 78. Modelo en CAD de la implementación de la tercera prensa, Vista Frontal.....	74
Figura 79. Modelo en CAD de la implementación. Nótese que esta va acoplada al sistema de transmisión actual y la platina para ejercer presión también esta acoplada al sistema de sujeción que tiene la máquina. ....	74
Figura 80. Dimensiones de la platina que une los vástagos de los cilindros neumáticos.....	75
Figura 81. Implementación de la platina que une a los vástagos. Nótese que la platina se sujeta al sistema actual que tienen los cilindros para aplicar la fuerza. ....	75

# Índice de Tablas

---

Tabla 1. Resultados del estudio de elementos finitos de la parte superior del bastidor. ....	21
Tabla 2. Tabla relación torque, fuerza lineal, velocidad lineal de las prensas.....	24
Tabla 3. Resultados del estudio de elementos finitos al vástago sin refuerzos. ....	29
Tabla 4. Tabla comparativa de resultados de los análisis de elementos finitos entre la estructura sin refuerzo y La estructura con refuerzo. ....	33
Tabla 5. Parámetros para la programación del variador de velocidad [24]. ....	35
Tabla 6. Resultados de los análisis de elementos finitos para los diferentes diámetros de barras de acero. ....	39
Tabla 7. Caracterización Motor.....	43
Tabla 8. Tabla de temperatura y voltaje de salida de las termocuplas. ....	49
Tabla 9. Frecuencia y PPM del sistema de movimiento. ....	50
Tabla 10. Desplazamiento en milímetros y salida en mili voltios de los sensores HS25. ....	52
Tabla 11. Tabla comparativa de la etapa de acondicionamiento de las termocuplas.....	57
Tabla 12. Voltaje de salida de la etapa de amplificación. ....	57
Tabla 13. Cálculo de las constantes del controlador por el método de Ziegler-Nichols.....	64

# Índice de Gráficas

---

Gráfica 1. Frecuencia Vs Revoluciones por minuto. ....	44
Gráfica 2. Torque vs Rpm del Motor.....	44
Gráfica 3. Torque Vs RPM del motor. ....	45
Gráfica 4. Relación presión Vs fuerza del cilindro.....	47
Gráfica 5. Caracterización válvula reguladora de presión neumática. ....	47
Gráfica 6. Voltaje de salida termocuplas vs temperatura de junta principal, con una temperatura de junta fría de 20°C.....	48
Gráfica 7. Relación entre voltaje de salida de las termocuplas y temperatura sensada. ....	49
Gráfica 8. Relación frecuencia y pasadas por minuto del sistema de movimiento.....	50
Gráfica 9. Relación entre la presión de entrada al sensor y la señal de salida del mismo. ....	51
Gráfica 10. Desplazamiento Vs Voltaje sensor 1. ....	52
Gráfica 11. Desplazamiento Vs Voltaje sensor 2. ....	53
Gráfica 12. Relación entre valor de PWM1 y las PPM del sistema de velocidad.....	62
Gráfica 13. Relación entre las señales de entrada y de salida en la identificación del sistema. ....	65

# Introducción

---

Los centros de investigación en ingeniería de pavimentos en Colombia detectaron la necesidad de desarrollar equipos con el fin de hacer pruebas dinámicas en mezclas asfálticas, es por esto que universidades del país, iniciaron procesos de desarrollo que incluyeron la adquisición o construcción de equipos para pruebas dinámicas, que pudieran dar soporte a especificaciones técnicas y de diseño del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) e Instituto Nacional de Vías (INVIAS) [1].

En el año 2005 el Grupo de Investigación en Geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada, liderado por el Ing. Oscar Javier Reyes Ortiz, decidió hacer el diseño, construcción e instrumentación de una máquina de deformación permanente, dado que este tipo de máquinas eran costosas y restringidas en el país.

Las máquinas de deformación permanente son utilizadas para determinar la velocidad de deformación y la deformación acumulada en las mezclas asfálticas, permitiendo evaluar la dureza de las muestras. En estas pruebas se pretende medir cambios en las mezclas dependiendo de factores específicos de cada ensayo. Un sistema constituido por cilindros neumáticos, ruedas y una estructura metálica, ejercen presión sobre mezclas asfálticas. El movimiento de las probetas lo realiza un motor trifásico y una excéntrica.

A la hora de realizar el ensayo que permite determinar la deformación permanente en mezclas asfálticas, se deben tener en cuenta las variables que intervienen de forma directa en el desarrollo del ensayo, es así como la presión, temperatura, velocidad y deformación cumplen un papel importante en el momento que se realiza el ensayo por lo tanto necesitan ser monitoreadas. El equipo con el que cuenta el grupo de investigación en Geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada para realizar este ensayo, no cuenta con un sistema centralizado que permita hacer control y visualización de estas variables. Además de no tener control sobre las variables que intervienen, el equipo tampoco es capaz de almacenar datos de los resultados del ensayo y tiene una serie de problemas mecánicos que impidieron su normal funcionamiento a partir del año 2010.

La finalidad de este proyecto es tener el ahuellador completamente funcional desde su aspecto mecánico, pasando por la instrumentación y sensorica del mismo, hasta contar con un sistema automatizado el cual permita tener medición y control sobre las variables que actúan en el sistema, con una aplicación en LabView que permita la interacción entre hombre y máquina.

El proceso será automático en todo el transcurso de la prueba, desde que el usuario da la orden de inicio desde el computador, hasta que termine la prueba, esto hace que la intervención humana sea mínima garantizando así mayor seguridad al personal que realiza el ensayo.

Las soluciones que serán propuestas para el mejoramiento a futuro de diseño mecánico y electrónico ayudarán a que el Grupo de Investigación en Geotecnia conozca cuales son

las fases posteriores del proyecto, con el fin de cumplir con la normatividad del IDU e INVIAS en su totalidad.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Automatizar la máquina ahuelladora que se encuentra en el laboratorio de Pavimentos, que pertenece al programa de Ingeniería Civil de la Universidad Militar Nueva Granada, con el fin de obtener mejores resultados y mayor precisión en el desarrollo de las pruebas.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar un método de ajuste general para la máquina ahuelladora.
- Implementar los canales de comunicación entre los sensores y actuadores con el PC.
- Diseñar una interfaz Usuario - PC donde se visualicen y guarden los resultados de la prueba de ahuellamiento, además que desde allí se tenga mando sobre la máquina.
- Detectar las fuentes de error que afectan la prueba y proponer alternativas de solución para mejorar el diseño mecánico y electrónico.

## **Alcances y delimitaciones**

Se pondrá en funcionamiento la máquina de ahuellamiento que se encuentra en la Universidad Militar Nueva Granada en el programa de Ingeniería Civil en el laboratorio de Pavimentos. Se harán correcciones sobre daños que están presentes en este momento para que se puedan llevar a cabo las pruebas.

Se desarrollará una interfaz de usuario por medio de una aplicación que permita monitorear lo que ocurre en la máquina, esta interfaz será capaz de hacer cambios en los puntos de referencia de las variables y visualizar el comportamiento de estas para su posterior análisis. Se automatizarán todos los sensores junto con los actuadores que están presentes, permitiendo con esto que en el desarrollo de la prueba se produzca la menor cantidad de errores y haciendo que el proceso sea casi automático.

Se implementarán los protocolos de comunicación para que el PC pueda leer y visualizar los datos de los sensores, y para que el PC pueda enviar señales a los actuadores para que estos hagan cambios en la prueba que se desarrolla.

Se propondrán alternativas de soluciones mecánicas y electrónicas que serán implementadas en fases futuras del proyecto. El desarrollo de este proyecto se llevará a cabo en la Universidad Militar Nueva Granada, en el Programa de Ingeniería Civil en el Laboratorio de Pavimentos y se culminará en el año 2012.

# **1 Ensayo para la medición de la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas**

---

En este capítulo se describirá la teoría de las mezclas asfálticas en caliente, la normatividad que rige el ensayo para la medición de la resistencia a la deformación en mezclas asfálticas, algunos equipos desarrollados para llevar a cabo este ensayo y como la automatización interviene para que los resultados del ensayo sean precisos y la intervención humana sea mínima. Lo anterior tiene como finalidad fundamentar teóricamente el presente proyecto.

## **1.1 Mezclas asfálticas en caliente**

Las mezclas asfálticas, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado, estas son fabricadas en una temperatura superior a la temperatura ambiente y varían según el firme donde se estén construyendo. Las mezclas asfálticas en caliente buscan proporcionar una capa de rodadura cómoda y segura para los vehículos circulantes. [2]

Entre las propiedades principales de los pavimentos se encuentra la durabilidad de las mezclas asfálticas, las principales causas que intervienen en el deterioro de los pavimentos se deben a los cambios de temperatura, condiciones ambientales como la lluvia, las cargas que ejercen los vehículos sobre el asfalto, la presión de inflado de los neumáticos, entre otros. Es por eso que la durabilidad de estas mezclas debe presentar alta resistencia al agotamiento y resistencia a las condiciones del medio ambiente donde se encuentra. [3]

## **1.2 Fallas en los pavimentos**

Una de las principales fallas de los pavimentos es la deformación plástica, que consiste en deformaciones permanentes de la capa superficial de la mezcla asfáltica produciendo deterioro en ésta. La falla que se presenta es llamada ahuellamiento, y se produce por la aplicación de cargas repetitivas rodantes, en este caso el tráfico. [4]

El ahuellamiento que se presenta por fallas en la capa asfáltica, es producto de la escasa capacidad portante o por la insuficiencia de soportar las aplicaciones de cargas pesadas y verticales en la superficie, en este caso por los neumáticos de los vehículos, produciendo así, una huella de forma distinta para cada tipo de neumático, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie, factores que desarrollan una resistencia al

corte, demasiado baja. Algunas veces la falta de resistencia puede ser originada por el desequilibrio entre el asfalto y la mezcla, provocado por daños por la humedad o debilitamiento del esqueleto del mineral. [5]

## 1.3 Equipos desarrollados para medir la deformación plástica

A través de los años se han venido desarrollando equipos que permiten realizar los ensayos de deformación permanente en mezclas asfálticas, equipos que con la tecnología actual permiten una medición precisa en los ensayos, algunos de estos equipos son:

El Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT), dispositivo desarrollado a mediados de los años ochenta, el GLWT permite realizar mediciones de ahuellamiento y control de calidad en las muestras de mezclas asfálticas, por medio de una rueda de acero se ejerce una carga de 445 N a través de una manguera presurizada a 690 KPa sobre la probeta, esto tiene como objeto simular el peso que ejercen los vehículos en el pavimento y por medio de un movimiento de vaivén simular el movimiento de los mismos. La temperatura se logra sumergiendo en agua la probeta permitiendo variar entre 40°C y 50°C. A continuación se muestra el Georgia Loaded Wheel Tester en la Figura 1. [6]



Figura 1. Georgia Loaded Wheel Tester [7].

Equipo para ensayo de Pista de Laboratorio, equipo desarrollado por el Centro de Carteras de España (CEDEX) y regido por las normas UNE EN 12697-22 y NLT-173, esta máquina tiene la capacidad para medir la resistencia a la deformación permanente en las mezclas asfálticas, este equipo es capaz de hacer ensayos tanto en probetas preparadas en el laboratorio como muestras extraídas de pavimentos. El ensayo radica en someter una probeta a una presión de  $900 \pm 25 \text{ kN/m}^2$ , con un movimiento de ida y vuelta a una frecuencia de  $42 \pm 1$  pasadas de vaivén por minuto y a una temperatura de  $60 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$  durante 120 minutos que es lo que dura el ensayo. En la Figura 2 se puede ver la máquina para ensayo de pista de laboratorio. [8]





Figura 2. Equipo para ensayo de Pista de Laboratorio. [9]

Asphalt Pavement Analyzer (APA) dispositivo capaz de evaluar el ahuellamiento, la fatiga y la resistencia a la acción de humedad de mezclas asfálticas en caliente, fue desarrollado en 1996 por Pavement Technology, Inc, a partir de una modificación en el modelo de Georgia. Su uso esta regido por la Norma AASHTO TP 63-03 Standard Test Method for determining Rutting Susceptibility of Asphalt Paving Mixtures using the Asphalt Pavement Analyzer. Esta prueba consiste en someter una muestra de mezcla asfáltica a una presión de 690KPa – 830KPa, a una temperatura de 40.6°C - 64°C con un movimiento de vaivén que simula los vehículos circulantes. La APA incluye un sistema de adquisición de datos automatizado, que obtiene medidas de ahuellamiento y muestra estas mediciones en un formato numérico y gráfico. Cinco mediciones se pueden tomar durante una sola pasada sobre una muestra rectangular y dos mediciones se pueden tomar durante una sola pasada sobre una muestra cilíndrica. La APA incluye un sistema de carga de la rueda controlable y presión de contacto que representan las condiciones reales a las que es sometida en campo. Cada muestra puede ser sometido a un nivel de carga diferentes (hasta 113 kg/250 lbs) resultante en contacto con presiones de hasta 200 psi (1378 kPa). [10]. En la Figura 3 se puede ver el equipo.



Figura 3. Asphalt Pavement Analyzer [11].

Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTDD) dispositivo utilizado en EE.UU y Europa para la evaluación de mezclas asfálticas, fue desarrollado en Alemania en 1970, el HWTDD esta

regido por la norma AASHTO T 324-04 Standard Method of test of Hamburg Wheel-Track testing of Compacted Hot Mix Asphalt, la cual permite realizar ensayos en dos muestras a la vez. El HWTD esta constituido por una rueda de acero, la cual realiza un movimiento de vaivén a una frecuencia de  $53 \pm 2$  pasadas/min, a la muestra asfáltica se le aplica una carga de 705N la cual está sometida a una temperatura entre 25°C-70°C. Ver Figura 4. [12]



Figura 4. Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD). [13]

Purdue University Laboratory Wheel-Tracking Device, este dispositivo desarrollado en la Universidad de Purdue, es similar al ensayo de Hamburgo, en este equipo se puede determinar el ahuellamiento potencial y la sensibilidad a la acción de humedad. A las probetas de asfalto se les aplica una presión de 620kPa a una velocidad de 33.2 cm/s, la rueda que incorpora es neumática y ésta debe tener una presión de 793kPa [14]. Ver Figura 5.

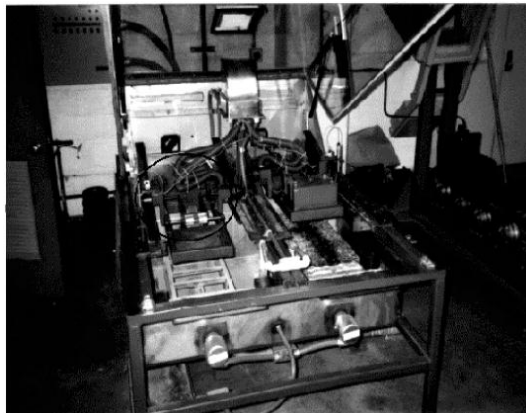


Figura 5. Purdue University Laboratory Wheel-Tracking Device. [15]

French Pavement Rutting Tester, este equipo permite medir la sensibilidad al ahuellamiento en mezclas asfálticas en caliente con un movimiento de vaivén. La metodología del ensayo es similar a otros equipos de ahuellamiento, se aplica una carga de  $5000 \pm 50$  N ,a través de una rueda que en este caso es neumática con una presión de inflado de  $0.6 \pm 0.03$  MPa, a una velocidad de 67 ciclos por minuto. Este equipo permite evaluar dos probetas paralelamente, la temperatura de ensayo va desde los 30 a los 70°C, usando comúnmente 60°C. Este equipo cuenta con un panel sistematizado en

donde se controla la presión entre otras variables que intervienen en el ensayo. La prueba se lleva a cabo conforme con la norma NF P 98-253-1 [16]. Ver Figura 6.



Figura 6. Fhwa.dot, Asphalt Pavement Technology.

Model Mobile Load Simulator (MMLS3) este equipo se desarrollo en Sudáfrica, este modelo realiza ensayos a escala 1/3 respecto a la real. Se aplica una presión de 2.1 KN con una presión de inflado de 800 kPa, generando una presión de contacto de 690 kPa. La rueda tendrá una velocidad de 120 pasadas/minuto y la probeta estará sometida a una temperatura que pude variar entre 50 y 60°C para condición seca y 30°C para condiciones de humedad [17]. Ver Figura 7

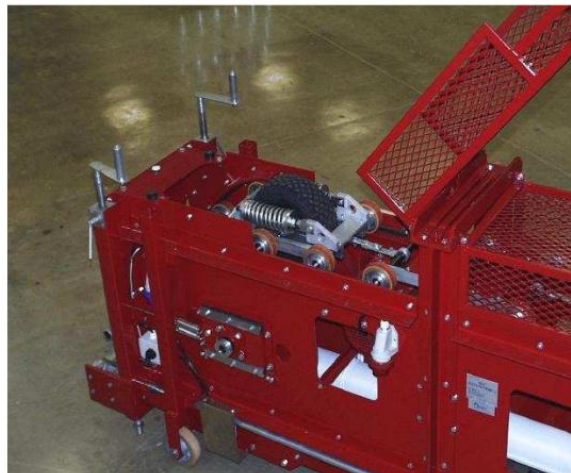


Figura 7. Model Mobile Load Simulator (MMLS3). [18]

## 1.4 Norma colombiana del Instituto Nacional de Vías (INVIAS)

La Norma INV-756 del Instituto Nacional de vías INVIAS, establece los procedimientos a seguir para realizar el ensayo de ahuellamiento, el cual busca determinar la resistencia a la deformación plástica en una mezcla asfáltica. Las probetas con las que se realiza el

ensayo pueden ser elaboradas en el laboratorio o provenir de testigos extraídos de pavimentos. Este procedimiento esta dirigido a mezclas asfálticas que están sometidas a condiciones extremas de tránsito y clima.

El ensayo radica en tener una probeta de la mezcla asfáltica, la cual va a estar sometida al paso alternativo de una rueda, esta rueda va a ejercer una presión específica en unas condiciones de temperatura previamente establecidas, esto con el fin de simular las condiciones del clima y de circulación del tránsito.

El equipo a utilizar debe constar de carros de forma rectangular, que son en donde van a ir montadas las probetas, estos carros deben ir soportados por rodamientos que permitan su fácil movimiento sobre unos perfiles de apoyo, estos carros estarán sujetos a una excéntrica que a su vez estará unida a un motor trifásico el cual va a generar un movimiento horizontal de vaivén. Sobre los carros deben estar situadas las ruedas para realizar el ensayo, las ruedas estarán sujetas a un brazo, este brazo esta libre en uno de sus extremos con un dispositivo que permita colocar las pesas que producen las diferentes cargas sobre las ruedas. Debe ubicarse un micrómetro que permita hacer lecturas de las deformaciones verticales que esta sufriendo la probeta. La rueda con que se realiza el ensayo debe ser metálica y estará recubierta por una banda de caucho macizo de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor, el cual tendrá una dureza de 80 en la escala de Dunlop. Este equipo debe ser diseñado para soportar una frecuencia de movimiento de vaivén de  $42 \pm 1$  pasadas por minuto.

El recinto del equipo debe alcanzar una temperatura constante para el ensayo, con una variación máxima de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . El recinto debe tener en uno de sus lados una ventana que permita realizar la lectura del micrómetro. [19]

## **1.5 Automatización de máquina ahuelladora de la Universidad Militar Nueva Granada**

A partir de los equipos que ya han sido desarrollados y teniendo en cuenta la necesidad que tiene el Grupo de Investigación en Geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada de realizar el ensayo para determinar la deformación plástica en mezclas asfálticas, se tomó la decisión de automatizar la máquina ahuelladora con la que cuenta el grupo. Debido a que revisando la documentación de los equipos que permiten realizar este ensayo, se encontraron aspectos en común, entre ellos la automatización e instrumentación, herramientas que permiten tener mayor precisión en las mediciones y facilitar las actividades para llevar a cabo el ensayo.

La Norma INV-756 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), no establece métodos de automatización o control para el mejoramiento de los resultados de la prueba y teniendo en cuenta que la automatización tiene como objetivo aumentar la competitividad a nivel industrial, además permite mejorar métodos para lograr la mínima intervención humana, es de gran ayuda que el equipo que realiza el ensayo para determinar la resistencia a la deformación plástica en mezclas asfálticas, este automatizado y sus procesos estén controlados.[19]

Se entiende como automatización, la integración de sistemas mecánicos, electrónicos, eléctricos y computarizados que trabajando en conjunto sirven para el control de maquinaria obteniendo resultados más óptimos, en menor cantidad de tiempo y sin la intervención de mano de obra humana. La complejidad de la automatización depende de los métodos con los que se controlen las variables que intervienen en los procesos, de tal manera que entre más variables se quieran controlar y el proceso de control que se desee, sea preciso, las técnicas de automatización se harán más complejas. [20]

En la Figura 8, se muestra la pirámide del proceso de automatización, detallando cada una de los niveles en los que ésta se divide. Para el desarrollo del proceso de automatización de la máquina ahuelladora solo serán implementados los niveles 1 y 2, que comprenden toda la instrumentación, sensorica y actuadores con los que cuenta el ahuellador, los dispositivos de control y adquisición de datos junto con el software que permite la interacción entre hombre y máquina.



Figura 8. Pirámide de proceso de automatización.

### 1.5.1 Instrumentación y sensorica de la máquina ahuelladora

En la ejecución de procesos de automatización se deben tener instrumentos que faciliten la medición de variables que intervienen en el sistema, estos elementos son llamados sensores o transductores y se han convertido en una opción para la adquisición de estas señales. Un sensor tiene la capacidad de convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir, dependiendo del tipo de sensor, su salida eléctrica puede ser voltaje, corriente, resistencia u otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. A través del tiempo se han venido desarrollando nuevos sensores, que permiten adaptar nuevos sistemas para captar y almacenar información en un ordenador, por ejemplo, en el caso del ensayo para medir la deformación plástica en mezclas asfálticas, es fundamental tener una medición de la temperatura y tener control sobre esta, existen sensores que ayudan a calcular las magnitudes con las que varía la temperatura, como lo son las termocuplas o termopares, RDT, termistor NTC, termistor PTC. [21]

En instrumentación las termocuplas son muy utilizadas para sensar la temperatura, las termocuplas son de bajo costo económico, las conexiones para estos sensores están estandarizadas y tienen un amplio margen de medición. Existen diferentes tipos de termocuplas pueden ser de tipo K, E, J, T, N, B, R o S, en este caso son de tipo J. [22]

Otro tipo de sensor que se usa en el proceso de automatización de la máquina para hacer ensayos de deformación permanente, son los de efecto hall. Los sensores de efecto hall, se usan para medir campos magnéticos o determinar la posición de un objeto, en este caso específicamente, se usará para determinar la posición de las prensas y así determinar las vueltas de vaivén por minuto. [23]

En el ensayo para determinar la deformación permanente, intervienen variables tan importantes como la carga que ejercen los vehículos sobre las mezclas asfálticas, en el caso del equipo que realiza este ensayo, se usaran dos actuadores neumáticos, estos por medio de la presión aplicada, simularán la carga de los vehículos. Aquí aparece una variable importante que es la presión, para poder medir esta variable se usara un sensor de presión neumática, el cual será capaz de convertir la señal de presión en una señal eléctrica, para luego procesarla. Por ultimo, se debe determinar en cuántos milímetros se deformó la muestra, esto se medirá por medio de un sensor de desplazamiento lineal. [24]

### **1.5.2 Actuadores de la máquina ahuelladora**

Los sensores son muy indispensables en la automatización, pero si trabajan solos, lo único que permiten realizar, es la visualización de procesos sin poder intervenir en ellos. Por esta razón, existen instrumentos que permiten tomar acciones sobre el proceso que se esté realizando, estos instrumentos son llamados actuadores. Estos son dispositivos mecánicos, cuyo objetivo es producir fuerza para mover o actuar. La fuerza producida por los actuadores puede provenir de tres fuentes principales que son: presión neumática, presión hidráulica y fuerza motriz, además dependiendo del origen de la fuerza, el actuador se denomina: hidráulico, neumático ó eléctrico. [25]

En el proceso de automatización del equipo para determinar la deformación permanente, como se dijo anteriormente se van a controlar tres variables fundamentales para el ensayo, la presión, la temperatura y las vueltas de vaivén por minuto. Ya se mencionaron los sensores que van a intervenir para poder medir estas variables, ahora los actuadores que se implementarán son: para el caso de la presión, se usarán actuadores neumáticos, específicamente se usarán cilindros neumáticos y una válvula reguladora de presión electro-neumática.

Las válvulas electro-neumáticas son dispositivos similares a las válvulas neumáticas, se diferencian en que las válvulas electro-neumáticas como su nombre lo indica, tiene un dispositivo electrónico acoplado a una válvula neumática convencional, el dispositivo electrónico permite que la válvula se pueda accionar mediante una señal eléctrica proveniente de un controlador, ya sea PLC, microcontrolador, etc. Otros actuadores neumáticos son los cilindros neumáticos, estos son actuadores que convierten la energía neumática en movimiento rectilíneo, los cilindros neumáticos pueden funcionar de varias maneras dependiendo del diseño, en el caso del ensayo para determinar la deformación permanente en mezclas asfálticas se usan para aplicar la carga a las probetas. [26]



Uno de los tipos de actuadores son los eléctricos, entre estos se encuentran relés de estado sólido, resistencias eléctricas, motores eléctricos, etc. Para la variación de la temperatura se usará un relé de estado sólido y una resistencia eléctrica. Un relé de estado sólido es un elemento que permite aislar los circuitos de control con los circuitos de potencia, este funciona como interruptor para encender o apagar la carga que en este caso enciende o apaga las resistencias eléctricas según sea el caso. Las resistencias eléctricas son elementos que se oponen al paso de la corriente, que a su vez producen calor dependiendo del material en que se construya la resistencia. [27]

Los motores eléctricos son elementos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, la energía origina el fenómeno de campos electromagnéticos variables que hace el cambio en el bobinado del estator. Los motores eléctricos son usados en la industria y son fabricados con diferentes potencias, se emplean para accionar máquinas-herramienta, bombas, montacargas, ventiladores, grúas, maquinaria elevada, sopladores, etc. [28]

### 1.5.3 Control y adquisición de datos

Adicionalmente a los elementos de medición y actuadores, se hizo necesario elementos que permitieran capturar las señales, para procesar de acuerdo a la medición y enviar señales de control a los actuadores. Entre los más comunes de estos elementos se encuentran PLC, los microcontroladores, tarjetas de adquisición de datos entre otros. El dispositivo que se va a usar es un microcontrolador de la empresa Microchip, este dispositivo es un integrado que permite ser programado para llevar a cabo una serie de instrucciones programadas por el diseñador, el microcontrolador tiene en su interior las tres principales unidades funcionales de un computador: unidad de procesamiento, memoria y periféricos de entrada y salida. Por medio del modulo de conversión análogo-digital se van a adquirir la señales para ser enviadas al PC y realizar el correspondiente control. [29]

Los sistemas de control hoy en día, se pueden desarrollar con diferentes tecnologías, pero los elementos principales que intervienen nunca variaran. En el proceso de automatización para el equipo que mide la deformación permanente, se utilizará control en lazo cerrado, y se utilizará la técnica de control clásico PID. En la Figura 9 se describen los componentes de control en lazo cerrado.

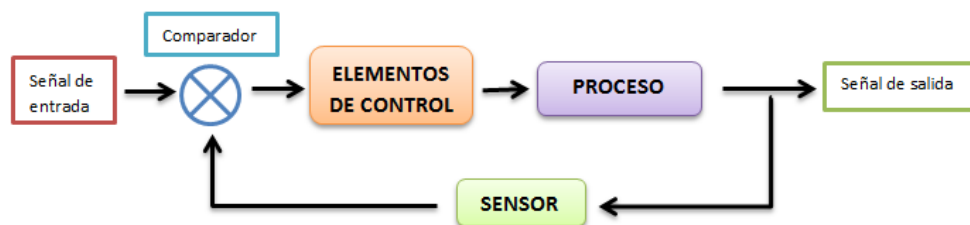


Figura 9. Elementos de un lazo cerrado de control.

## 2 Puesta en funcionamiento

---

La máquina ahuelladora fue elaborada por el Grupo en Geotecnia del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Militar Nueva Granada en el año 2005, desde entonces a la máquina ahuelladora se le han hecho una serie de modificaciones para que su funcionamiento fuera continuo, a finales del año 2010 ésta presentó algunas fallas críticas que impidieron que volviera a funcionar. En este capítulo se describirá todo el proceso que se realizó para poner en funcionamiento la máquina ahuelladora, primero se hará una descripción de los componentes principales que tiene la máquina ahuelladora, seguido a esto se reseñarán todos los problemas con los que se encontró el equipo a la hora de iniciar el proyecto y posteriormente, se explicarán los procedimientos que se siguieron para reconstruirla, ponerla en funcionamiento y exponer los posibles diseños de solución.

### 2.1 Descripción de la máquina ahuelladora

En esta sección se hará una subdivisión de cada uno de los sistemas que tiene el ahuellador para describir en detalle los elementos con los que cuenta éste, en la Figura 10 se muestra el modelo en CAD de la máquina ahuelladora para tener una visión general de como fue concebido por primera vez éste equipo.

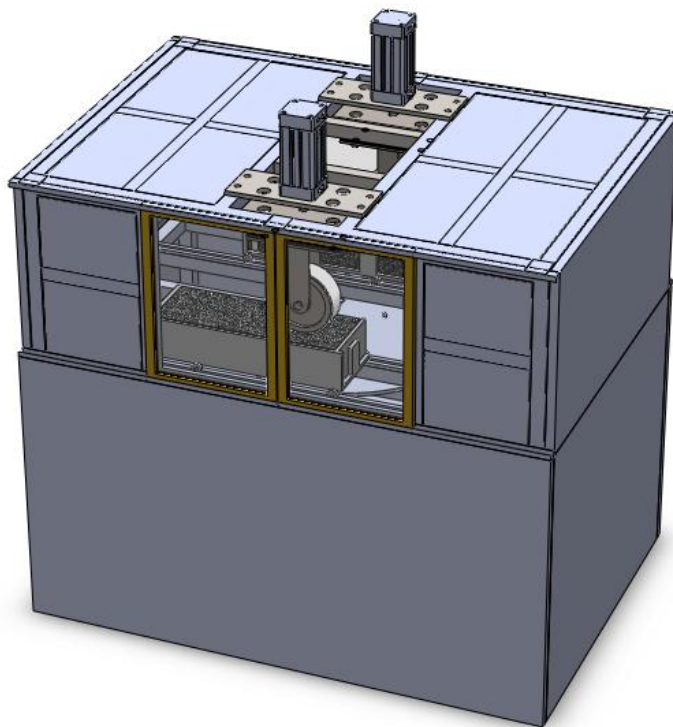


Figura 10. CAD de la máquina ahuelladora.



### 2.1.1 Transmisión de movimiento

El sistema de transmisión de movimiento, cuenta con un conjunto de elementos que permiten que el movimiento rotacional que es generado por el motor trifásico se transforme de movimiento lineal en la prensas. En la Figura 11 se muestra el sistema de transmisión con el que cuenta la máquina ahuelladora, aquí se puede observar algunos de sus elementos principales como el motor trifásico y excéntrica, elementos claves en este sistema.



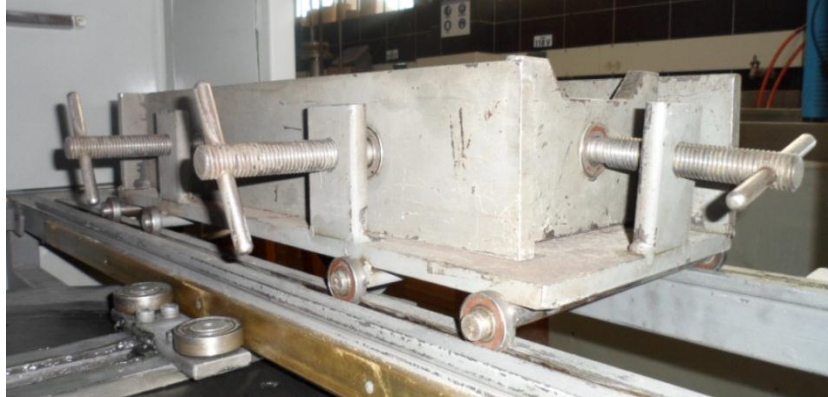
Figura 11. Sistema de transmisión de movimiento de la máquina ahuelladora.

Este sistema cuenta con las siguientes piezas:

- Motor-reductor trifásico.
- Excéntrica.
- Prensas.
- Rodamientos.
- Platina de sujeción prensas-excéntrica.
- Acople flexible tipo araña.

El movimiento lineal de las prensas que sujetan las muestras de asfalto, es generado por un motor trifásico que transmite el movimiento de rotación por medio de un acople al eje de la excéntrica, que a su vez cuenta con una platina que está unida a las prensas. El sistema de movimiento cuenta con una excéntrica que tiene un diámetro de 655mm, la cual tiene diferentes puntos de operación, estas posiciones de trabajo son los que determinan el recorrido total de cada una de las prensas. Las prensas que están unidas a la excéntrica, cuentan con una serie de rodamientos de cojinetes de bola, los cuales se encuentran apoyados en 8 puntos diferentes de estas, este conjunto de rodamientos

permiten que las prensas se deslicen sobre unas guías que evitan que se descarrilen como se puede observar en la Figura 12.



**Figura 12. Sistema de prensas y rodamientos que permiten el movimiento lineal.**

El movimiento rotacional de la excéntrica se transmite por medio de un acople flexible tipo araña, que va en el eje del motor-reductor al eje de la excéntrica como se observa en la Figura 13. La platina que va unida a las prensas cuenta con una serie de rodamientos de cojinete de bola, que están dispuestos de tal forma que permitan aferrar el perfil del bastidor, el cual cuenta con unas guías de bronce para evitar que el desgaste por fricción dañe los rodamientos, en la Figura 14 se puede observar la platina con sus rodamientos y guías de bronce.



**Figura 13. Acople flexible tipo araña usado para la transmisión de movimiento.**



Figura 14. Platina transmisión de movimiento, rodamientos de sujeción y guías de bronce.

### 2.1.2 Bastidor

El bastidor de la máquina está hecho en perfil CR calibre 16, de 4cm x 4cm, ésta es la estructura principal de la máquina, en la Figura 15 se puede observar el diseño en CAD del bastidor, para ver las dimensiones ver Anexo 1. La estructura se divide en dos partes importantes, una inferior y otra superior. Esta división se hizo con el fin de dividir el espacio que es usado para realizar el ensayo y el sistema de transmisión de movimiento.

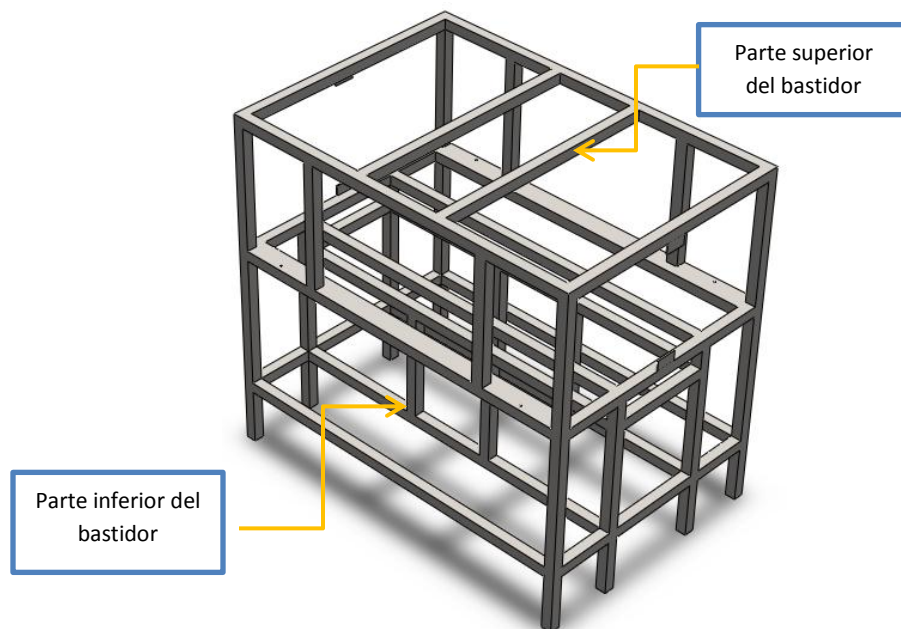


Figura 15. Vista isométrica de la estructura metálica de la máquina.

La parte superior del bastidor es usada para el montaje de las probetas y es donde se va a desarrollar el ensayo, por esta razón, el bastidor cuenta con un material que permite el aislamiento de calor del interior con el exterior, el material usado para esta necesidad es fibra de vidrio. La fibra de vidrio debido a sus propiedades mecánicas, permite hacer un aislamiento térmico que mantiene el calor al interior del habitáculo haciendo que las

perdidas sean mínimas. En la Figura 16 se puede observar como está puesta la fibra de vidrio.

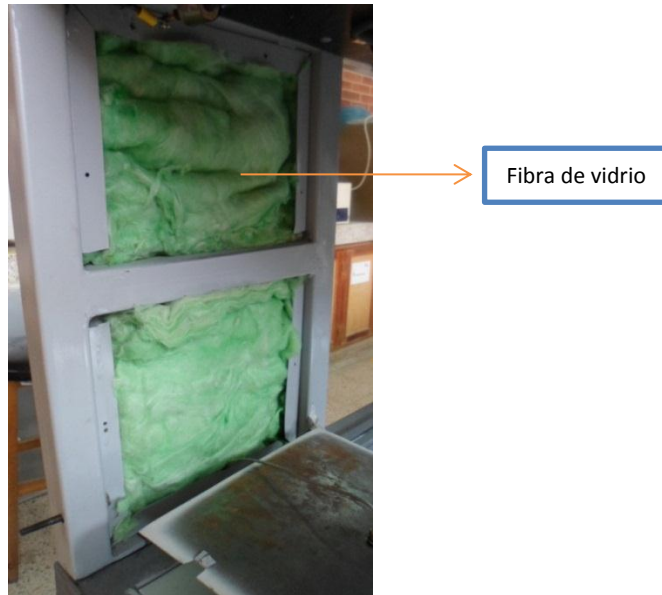


Figura 16. Ubicación de la fibra de vidrio usada como aislante de calor.

### 2.1.3 Sistema neumático

Según los requerimientos del ensayo, se debe ejercer una carga a las muestras asfálticas, esto con el fin de simular el peso de los vehículos que circulan sobre el pavimento, es por esta razón que el ahuellador cuenta con un sistema de dos cilindros neumáticos, uno por cada probeta, y una válvula reguladora de presión de 5 vías, esto permite hacer una variación de presión entre 0,6 Mpa y 1,2 Mpa. Para lograr esta presión en la superficie de la muestra, es necesario calcular el área de contacto de las llantas, que se define por la ecuación 1, sabiendo el área de contacto de las llantas, es regulada la presión de entrada a los actuadores y por lo tanto se varía la fuerza vertical que ejercen las llantas. En Figura 17 se muestra el diseño en CAD de este modelo, aquí se puede observar como fue dispuesto el sistema neumático inicialmente. Los elementos que conforman el sistema neumático del ahuellador son los siguientes:

- Cilindros neumáticos.
- Válvula reguladora de presión.
- Llanta.
- Mecanismo de sujeción de la llanta al vástago de los cilindros neumáticos.

$$Ac = \left(\frac{An}{2}\right)^2 * \pi \quad \text{EC 1.}$$

Ac = Área de Contacto  
An= Ancho de la llanta

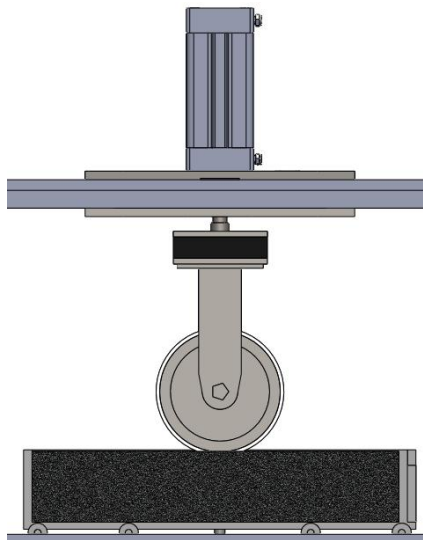


Figura 17. Modelo en CAD del sistema neumático con el que cuenta el ahuellador.

#### 2.1.4 Actuadores y sistemas de control

- Variador de velocidad.

El variador de velocidad es el encargado de controlar la velocidad del motor trifásico, el operador o persona que este realizando el ensayo varía la frecuencia manualmente para que la velocidad varíe de acuerdo a lo deseado. El variador de velocidad es de marca Yaskawa de la familia j7 se puede observar en la Figura 18.

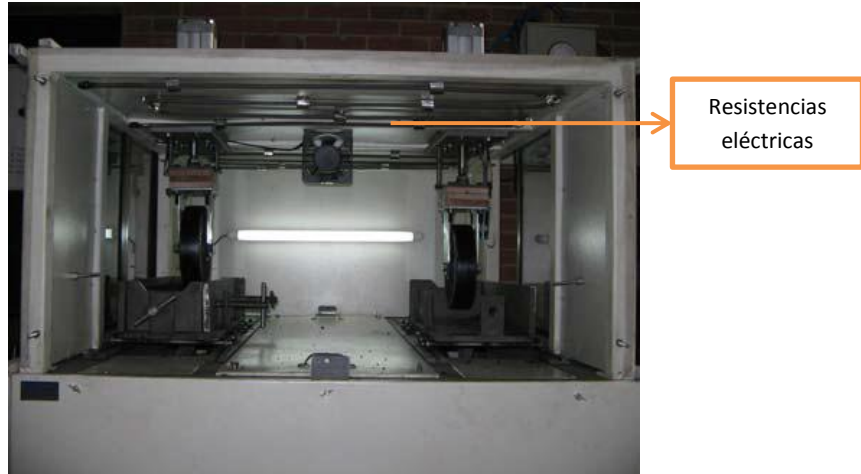


Botones para variar la frecuencia

Figura 18. Variador de velocidad Yaskawa.

- Resistencias eléctricas y control de temperatura.

Con el fin de generar calor y controlar la temperatura para el desarrollo de las pruebas, el ahuellador cuenta con dos resistencias de 1800 W de potencia a 220 V, las cuales se encargan de generar el calor dentro del habitáculo, como se puede ver en la Figura 19.



**Figura 19. Resistencias eléctricas ubicadas dentro del habitáculo para generar calor. [1]**

Para efectos de controlar la temperatura en el interior, la máquina ahuelladora contaba con un control de temperatura SR1 Shimaden, ver Figura 20, este no estaba dentro de un sistema centralizado de monitoreo, el set-point de temperatura se introducía manualmente antes de cada ensayo.



**Figura 20. Control de temperatura Shimaden SR1.**

La realimentación del sistema es realizado por 4 termocuplas tipo J ubicadas en puntos diferentes equidistantes y a la misma altura de las muestras asfálticas y para mantener una temperatura uniforme dentro del habitáculo, el ahuellador tiene un ventilador que generando turbulencia dispersa el aire al interior del habitáculo haciendo que este tenga una temperatura uniforme.



- Sensores y sistema de adquisición de datos.

La máquina ahuelladora contaba con una tarjeta de adquisición de datos de marca National Instrument, ésta era la encargada de recibir la señal de los sensores y enviar esta información al PC. A la vez el ahuellador contaba con dos sensores que eran los encargados de medir la profundidad que tenía la huella al finalizar el ensayo.

## 2.2 Estado Inicial de la Máquina Ahuelladora

### 2.2.1 Transmisión de movimiento

Se encontró que las prensas tenían un recorrido total de 360 mm, es decir que el radio de operación de la excéntrica es de 180 mm, debido a esto, las huellas en los ensayos tenían 120mm más de la longitud respecto a lo que exige la Norma INV E-756-07 [13]. Además de esto, el sobre-recorrido hace que las llantas de la máquina se choquen bruscamente contra la estructura metálica de las prensas.

El acople flexible tipo araña presentaba ruptura, esto debido a que los prisioneros estaban desgastados, y la cantidad de prisioneros no es suficiente, unido a este problema los prisioneros se estaban soltando, haciendo que el acople se separara entre y produciendo el daño anteriormente descrito. Ver Figura 21 para observar el daño de acople.

Todo el conjunto de piezas móviles entre ellos los rodamientos presentaban desgaste, debido a la constante fricción producida por el movimiento, las guías de bronce presentaban el mismo daño, por las mismas razones que la de los rodamientos como se puede observar en la Figura 22.



Figura 21. Acople flexible tipo araña, desgaste.

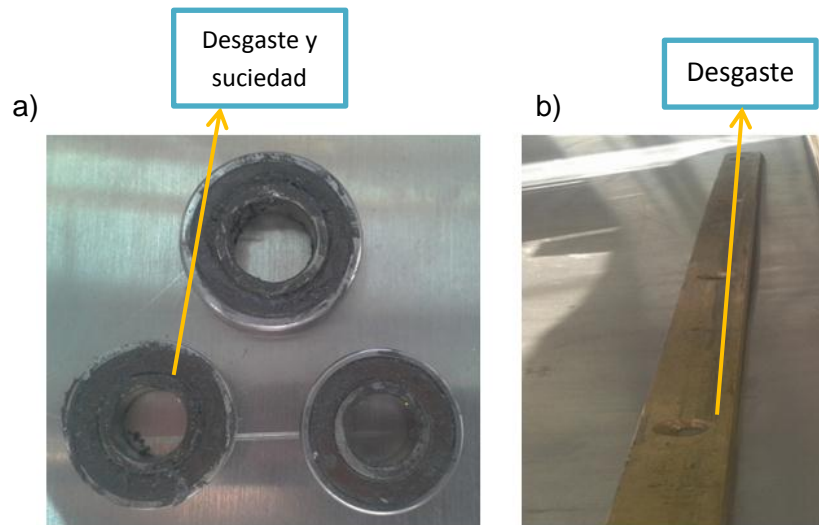


Figura 22. Daños a piezas. a) Rodamientos dañados. b) Guías de bronce desgaste por fricción.

### 2.2.2 Bastidor

El bastidor de la máquina consta de dos partes una superior y una inferior, en la Figura 23 se puede observar el diseño en CAD del bastidor. Debido a los esfuerzos generados durante el ensayo, se encontró que la estructura estaba deformada. Se realizó un análisis de elementos finitos para poder cuantificar estos esfuerzos, en la Figura 24 se puede observar los resultados de este estudio y en la tabla 1 se analizan los resultados. Para este análisis se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- El estudio que se realizó fue un análisis estático.
- La magnitud de la fuerza aplicada es de 2000N.
- El punto de aplicación de la fuerza se hizo donde van ubicados las platinas de los cilindros neumáticos.
- Se tomaron como puntos de sujeciones fijas las caras inferiores de los parales.

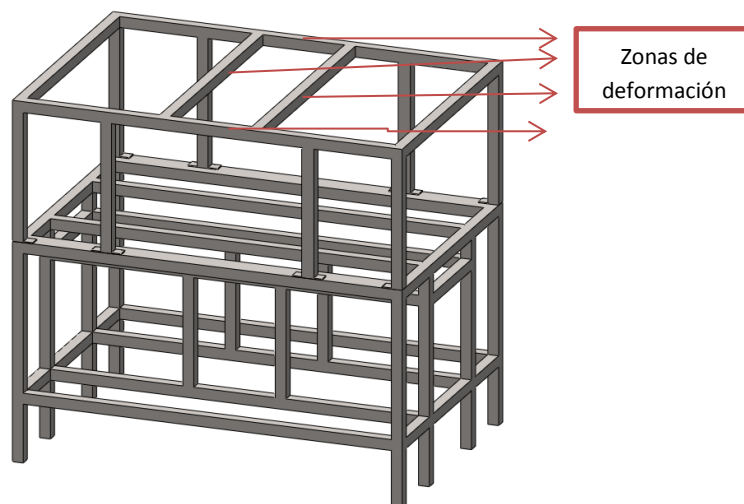


Figura 23. Diseño CAD del bastidor



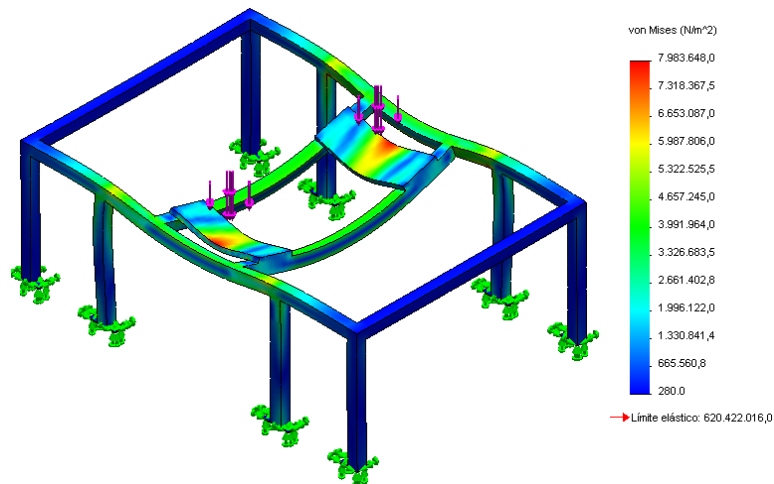


Figura 24. Resultados del estudio de análisis de elementos finitos. Nótese la deformación en la parte donde están situados los cilindros neumáticos.

<i>ESTUDIO</i>	<i>ESTRUCTURA SIN REFUERZO</i>
<i>Tensión Von Mises (<math>N / m^2</math>)</i>	7.983.648
<i>Desplazamiento (mm)</i>	0,1225
<i>Deformación Unitaria Equivalente</i>	2,519 e-5

Tabla 1. . Resultados del estudio de elementos finitos de la parte superior del bastidor.

### 2.2.3 Aislamiento térmico

Debido a que el sistema que eleva la temperatura interna de la máquina hasta 60°C aproximadamente, es necesario que las perdidas de temperaturas sean mínimas, la máquina ya contaba con aislamiento en cada una de sus paredes, pero se presentaban inconvenientes en cuanto a el aislamiento de las resistencias con referencia a la superficie con la que estaba en contacto, en la Figura 25 se observa como estaban de cerca las resistencias del área de sujeción.



Figura 25. Ubicación de las resistencias dentro del horno, se puede observar el desgaste de las láminas producto por las altas temperaturas de las resistencias.

#### 2.2.4 Motor Trifásico

La máquina ahuelladora tiene un motor trifásico de 1,5Kw de potencia, tipo jaula de ardilla, el motor se encuentra con una conexión tipo estrella, es el encargado de ejecutar el movimiento rotacional que impulsa las prensas. La conexión tipo estrella es usada en la industria para el arranque de motores, pero no es recomendable que se use cuando el motor alcance su punto nominal, debido a que este tipo de conexión requiere una gran cantidad de corriente por lo tanto el consumo de potencia es grande.

#### 2.2.5 Variador de Velocidad

El controlador del motor es un variador Yaskawa de la familia J7, este es el encargado de variar la frecuencia de operación del motor y de esta forma cambiar la velocidad de desplazamiento de las prensas, este variador estaba configurado para que el operario indicará manualmente la frecuencia de trabajo por medio de los botones del variador.

#### 2.2.6 Cilindros neumáticos

Se encontró que los vástagos de los cilindros neumáticos presentaban ruptura en uno de sus extremos debido a los esfuerzos generados por el movimiento de las prensas, ver Figura 27. Además la rueda chocaba con las prensas repetitivamente transmitiendo ese esfuerzo de choque al vástago que unido con los otros esfuerzos lo hacia fallar por fatiga. A continuación se describe el análisis estático para estimar las magnitudes de los esfuerzos generados.

- Primero se halló las fuerzas verticales que actúan en el sistema, esto se realizó con la ecuación 2, conociendo el diámetro del embolo del cilindro  $d=80\text{mm}$ , es posible hallar el área transversal de este, ecuación 3. La presión ejercida en el cilindro se obtiene de acuerdo a los requerimientos establecidos en la norma [13] que rige el ensayo, los cuales son:

$$P_{min} \text{ 27 PSI} = 186159 \text{ Pa y } P_{max} = 55 \text{ PSI} = 379213 \text{ Pa}$$

$$A_t = \pi r^2 = \pi(0.04\text{m})^2 = 0.005026\text{m}^2 \quad \text{EC 2.}$$

$$p = \frac{f}{A} \quad \text{EC 3.}$$

1.  $f$ =Fuerza ejercida.
2.  $A$ =área del embolo.
3.  $P$ =Presión aplicada al cilindro neumático

Despejando la ecuación anterior, teniendo como incógnita  $f$  se obtiene la ecuación 4. Al haber calculado el área transversal del embolo del cilindro, saber las presiones estipuladas para la prueba, y haber despejado la formula, es calculada las fuerzas mínimas y máximas que ejerce el cilindro a las llantas y estas a su vez a las muestras.

$$f = P.A \quad \text{EC 4.}$$

$$f_{min} = 186159\text{Pa} * 0.005026\text{m}^2 = 936\text{N}$$

$$f_{max} = 379213\text{Pa} * 0.005026\text{m}^2 = 1905\text{N}$$

- Luego de obtener las fuerzas verticales ahora se hallan las fuerzas horizontales, estas fuerzas se calculan conociendo el torque del motor-reductor y el radio de la excéntrica, mediante la ecuación 5 se obtiene las magnitudes de la fuerza. Se toma un radio de 140mm que es el que está configurado inicialmente en la excéntrica y el valor del torque es obtenido de la caracterización del motor. En la Figura 26 se muestra la configuración de la excéntrica en el punto de radio 140mm, el sentido de la fuerza lineal y la velocidad lineal transmitida a las prensas, también el sentido del torque que entrega el motor.

$$\text{Fuerza Lineal } (f_L) = \frac{\text{Torque}(T)}{\text{radio}(r)} \quad \text{EC 5.}$$

Esta formula nos da como resultado una  $f_{Lmin} = 1243,40\text{N}$  y  $f_{Lmax} = 6031,46\text{N}$

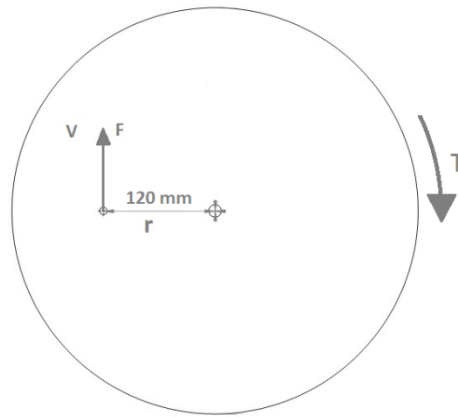


Figura 26. Fuerza lineal y velocidad lineal, con radio 120mm.

También se calculo la velocidad lineal de las prensas, teniendo los valores de la velocidad angular con la cual gira el eje del motor y sabiendo el punto de trabajo de la excéntrica, se implementa la Ecuación 6.

$$\text{Velocidad Lineal } (V_L) = \text{Velocida Angular } \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) * \text{Radio } (m) \quad \text{EC 6.}$$

Aplicando las ecuaciones 5 y 6, se calculan las magnitudes de las velocidades y fuerzas lineales a las que va a estar sometidas las prensas. Ver Tabla 2.

Torque (Nm)	Fuerza Lineal (N)	Velocidad Lineal (m/s)
1193,66	6631,46	0,23
622,78	3459,90	0,43
434,05	2411,44	0,62
325,54	1808,58	0,83
265,26	1473,67	1,01
223,81	1243,40	1,21

Tabla 2. Tabla relación torque, fuerza lineal, velocidad lineal de las prensas.

Las magnitudes de las fuerzas que se hallaron son utilizadas para hacer los estudios correspondientes de elementos finitos para determinar fallas y correctivos que se hagan sobre el ahuellador.



Figura 27. . Vástagos dañados. Nótese la falla por fatiga.

Según los datos obtenidos del análisis estático y conociendo las fuerzas que actúan sobre los actuadores tanto horizontales como verticales se hizo un estudio en elementos finitos con ayuda de SolidWorks, este software permite analizar que pasa al aplicar diferentes esfuerzos sobre el sistema.

Se toma una fuerza horizontal de 2000 N, esta fuerza simula la máxima presión que es aplicada en cada uno de los actuadores, y una fuerza vertical que es aplicada al eje de la rueda, esta fuerza va a simular las cargas de choque y las cargas que son ejercidas por el motor para que se realice el movimiento, la magnitud de esta fuerza va a ser de 6000 N, que según los cálculos de estáticos corresponden la máxima fuerza producida. Se pondrán puntos de sujeciones fijas en las caras inferiores de los parales de la estructura superior, en las platinas donde están ubicados los cilindros neumáticos y en las paredes del embolo, estas sujeciones simularán las partes no móviles del ahuellador. Serán analizados, las tensiones (Von Mises), desplazamiento (URES) y la deformación unitaria (ESTRN), estos son los resultados que determinarán el fallo.

En la Figura 28, se muestra el estado inicial del sistema de cilindros y ruedas, en este estudio es analizado el actuador neumático desde el embolo y vástago.

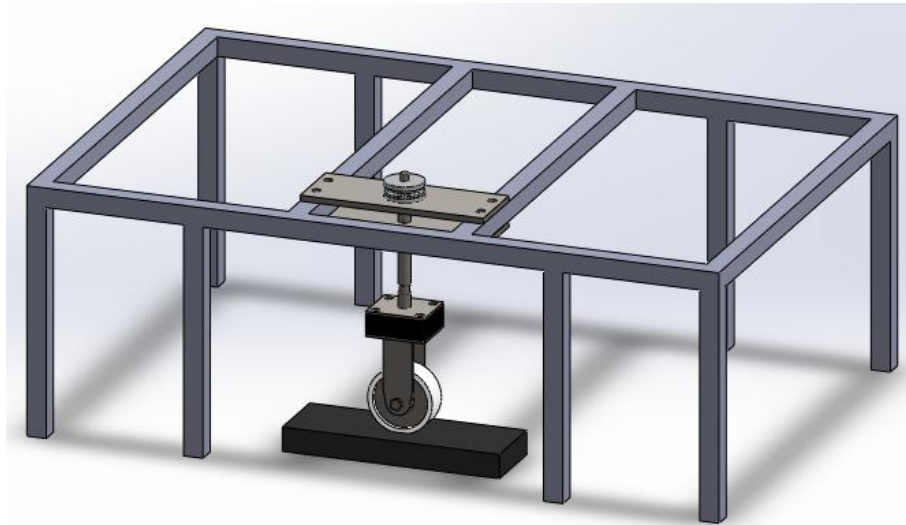


Figura 28. Cilindro unido a sistema de ahuellamiento. Estado en que se encuentra el vástago al inicio del proyecto.

A continuación se mostraran los resultados de los análisis de elementos finitos:

### Tensiones (Von Mises)

A continuación se puede visualizar las deformaciones que sufre el vástago en el estado actual de la máquina. Primero se muestra el estudio de tensiones por Von Mises en diferentes vistas, la Figura 29 muestra una vista frontal, en las Figura 30 se hace un acercamiento para observar en donde está fallando el vástago debido a los esfuerzos a los que es sometido. Este estudio nos permite analizar en que puntos el vástago absorbe la mayor parte de energía o donde se concentra la mayor cantidad energía.

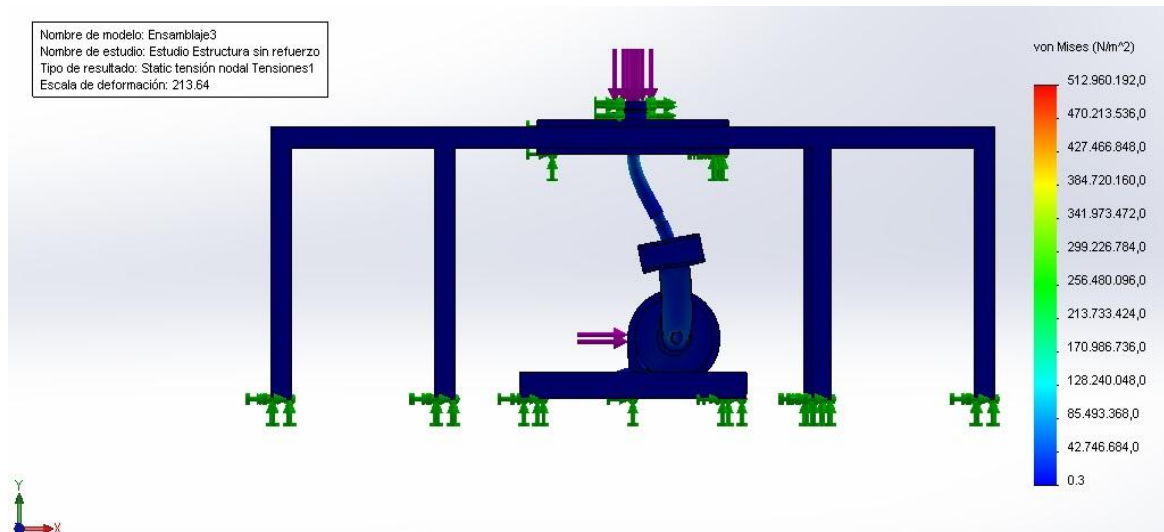


Figura 29. .FEM Von Mises cilindro sin refuerzos (Vista Frontal).

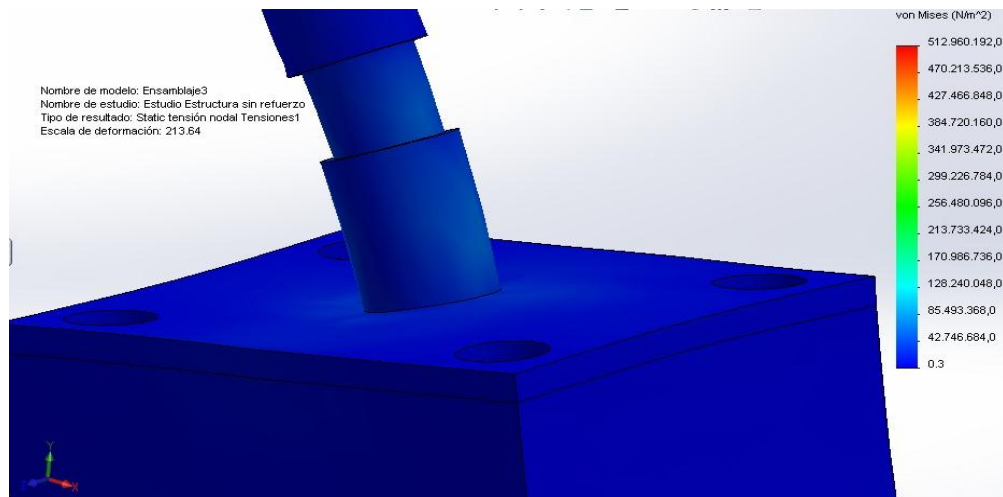


Figura 30. .FEM Von Mises cilindro sin refuerzos (Acercamiento).

### Desplazamientos (URES)

En este estudio se analiza que tanto se desplaza el vástago, como se observa en el diseño inicial, el actuador neumático está dispuesto de tal manera que el vástago se extiende o contrae horizontalmente, pero debido a las fuerzas verticales que actúan sobre este, el vástago va a tener un desplazamiento vertical y siendo el desplazamiento cíclico va a provocar que este sufra una falla por fatiga y finalmente cause la ruptura. En la Figura 31 se observan los desplazamientos de todo el sistema que compone la llanta y en la Figura 32 se hace un acercamiento para poder ver más detenidamente el comportamiento del sistema.

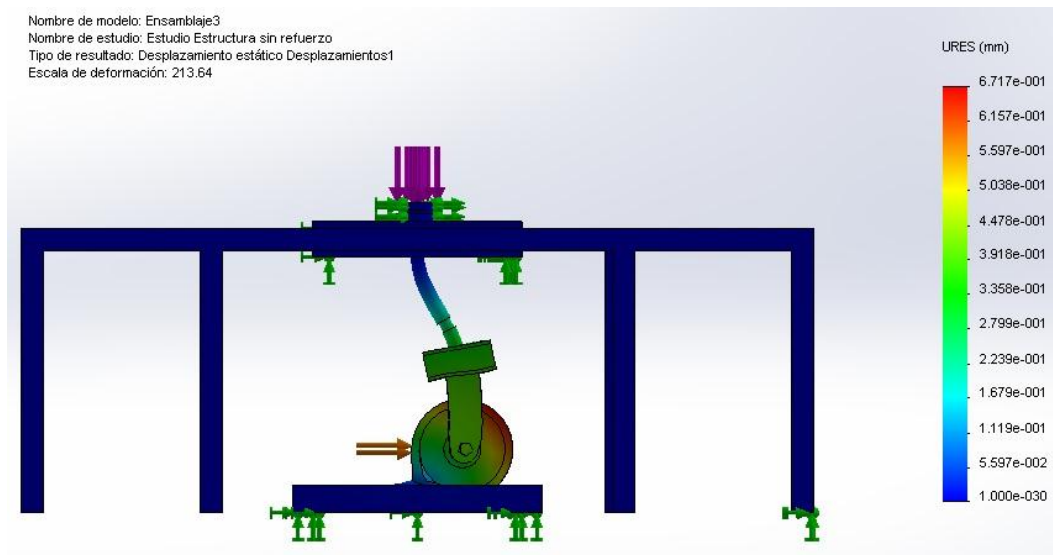


Figura 31. FEM Ures cilindro sin refuerzos (Vista Frontal).

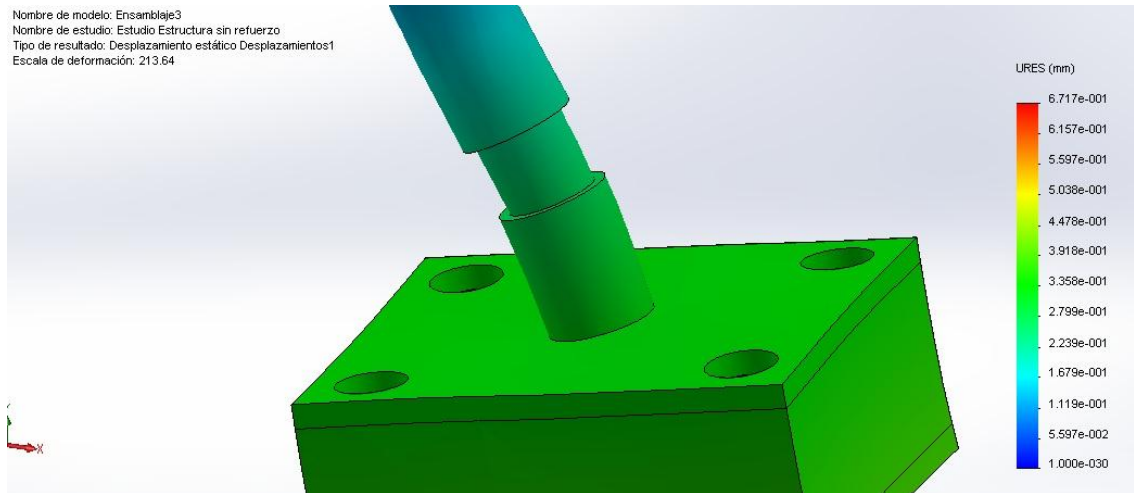


Figura 32. FEM Ures cilindro sin refuerzos (Acercamiento).

### Deformaciones Unitarias (ESTRN)

Este estudio permite analizar las deformaciones que hay por unidad de volumen, con este estudio se puede observar que tanto se deforma el material en puntos determinados y se puede ver en que áreas específicas hay mayor deformación. En la Figura 33 se observa una vista frontal de las deformaciones y en la Figura 34 se puede ver las deformaciones del vástago el cual es el objeto de estudio.

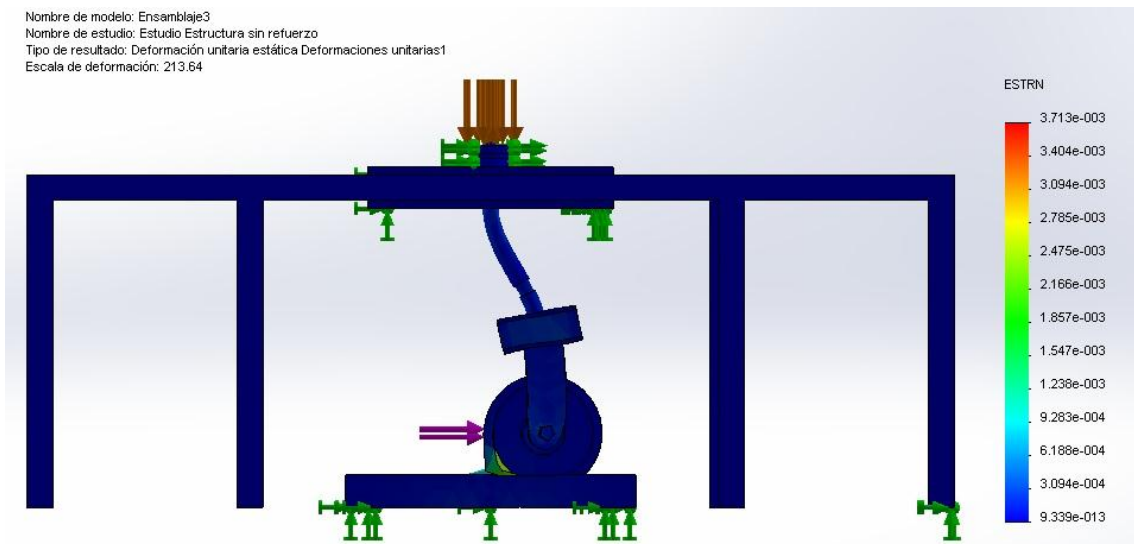


Figura 33.FEM ESTRN cilindro sin refuerzos (Vista Frontal).



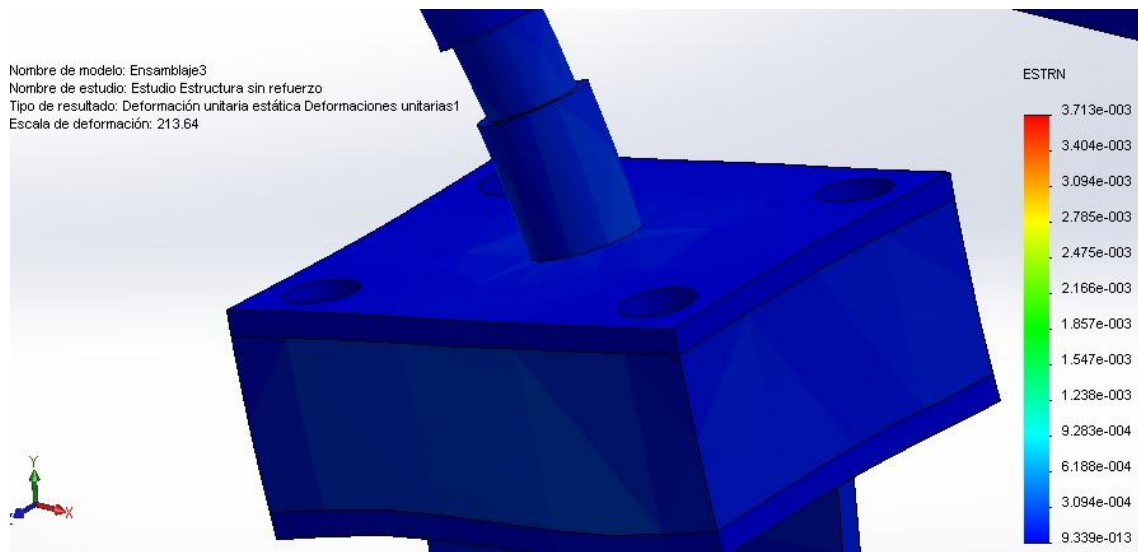


Figura 34. FEM ESTRN cilindro sin refuerzos (Acercamiento).

	<b>Tensiones Von Mises (<math>N/m^2</math>)</b>	<b>Desplazamientos Ures (mm)</b>	<b>Deformaciones Unitarias ESTRN</b>
<b>Rango</b>	85.493.368 – 128.240.048	$3.918e^{-1} - 4.478e^{-1}$	$9.283^{-4} - 1.238e^{-3}$

Tabla 3. Resultados del estudio de elementos finitos al vástago sin refuerzos.

Con los resultados obtenidos en la tabla 3, se puede concluir que las magnitudes de fuerzas son grandes produciendo fallas en los vástagos. Si se analiza detalladamente el máximo valor de cada uno de los estudios, en el caso de las tensiones Von Mises, se observa que ésta magnitud es de  $128.24 \text{ kN/m}^2$ , siendo este un valor elevado, y si se combina este esfuerzo a un ciclo repetitivo, se obtendrá como resultado una falla por fatiga. En el mismo orden de ideas, si se tiene en cuenta los resultados de los desplazamientos y las deformaciones, y comparando el lugar donde se concentran estos esfuerzos con los vástagos reales, se puede ver que la falla se presenta en el mismo lugar donde están fracturados los vástagos, y que la fractura se produce por fatiga del material.

## 2.3 Intervención y puesta en funcionamiento de la máquina ahuelladora

Conociendo la máquina a fondo y teniendo en cuenta el estado en el que se encontró, se procede a reconstruirla y ponerla en funcionamiento. En esta sección se describirá cada paso que se siguió, métodos utilizados, análisis de las propuestas de solución a fallas, costos y beneficios de las soluciones y como se llevaron a cabo las mismas.

### 2.3.1 Transmisión de movimiento

Como se dijo anteriormente en la sección 2.2.1 se presenta un sobre recorrido en las prensas que hace que las llantas se estrellen con la estructura metálica de las mismas. La solución a este problema fue cambiar el punto de trabajo de la excéntrica y hacer el recorrido de las prensas más corto como lo indica la norma [13], para aprovechar las dimensiones que tienen las prensas que son 517 mm de largo por 200 mm de ancho, fue implementado un nuevo punto de ejecución, que tiene un recorrido de 240mm como lo exige la norma, y de esta forma evitar que las llantas golpeen la estructura. La Figura 35 muestra la modificación de la excéntrica.

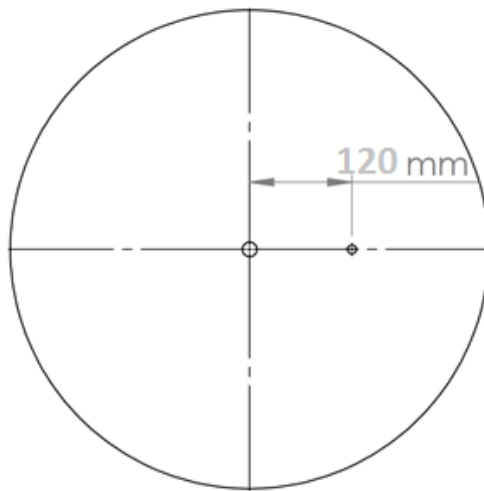


Figura 35. Modificación excéntrica, con radio de 140mm.

En la Figura 36, se puede ver como es el movimiento de la prensa con respecto a la llanta, esto demuestra que la llanta no va a tocar la estructura de la prensa, además de esto tienen una tolerancia de 56,5 mm de un lado y 42,5 mm del otro, las tolerancias no son iguales porque de un lado cierra la prensa.

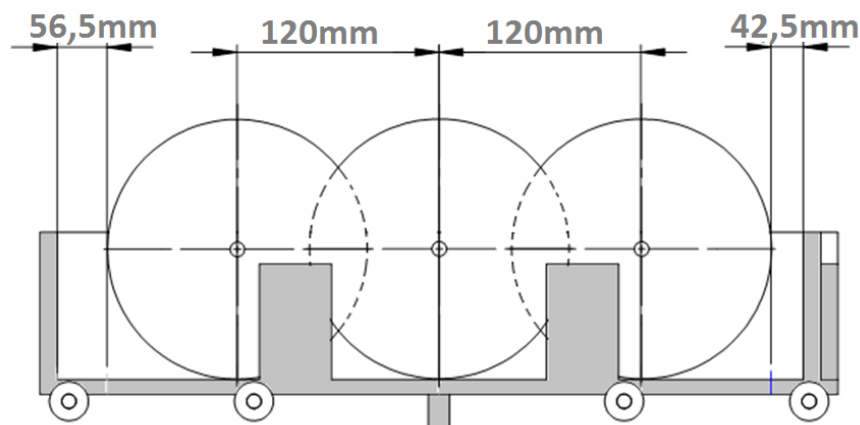


Figura 36. Cálculos de movimiento de la prensas con respecto a las llantas.

Asociado a este problema se encontró una serie de elementos que fue necesario cambiar para que el sistema de transmisión funcionará de una manera adecuada, los elementos que se cambiaron fueron los rodamientos, tanto los de las prensas, como los que van en la platina que unen las prensas a la excéntrica y el rodamiento que va en el medio de la platina. También se cambio las platinas de bronce que sirven como guía para los rodamientos de agarre de la platina.

Debido a que el acople flexible tipo araña se encontraba en mal estado, también fue necesario cambiarlo. Para evitar que el acople se siguiera dañando se ampliaron el número de tornillos prisioneros que aseguran el acople a cada uno de los ejes como se observa en la Figura 37.

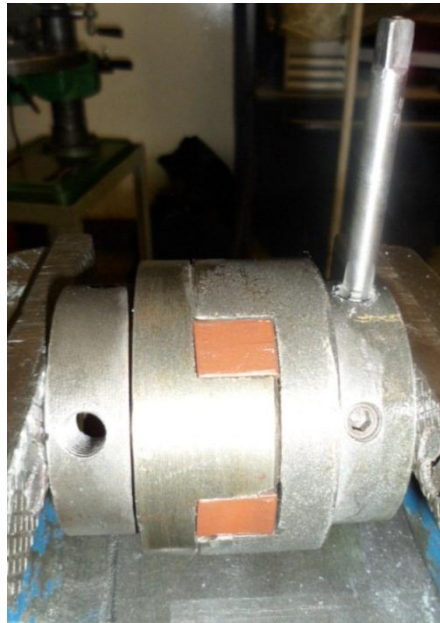


Figura 37. Acople flexible tipo araña. Detállese bien el nuevo acople y el proceso para poner los nuevos prisioneros.

### 2.3.2 Bastidor

Una de las mejoras a futuro será la implementación de un tercer actuador que estaría situado en el centro de la máquina, es por esto que se decidió reforzar la estructura metálica de la parte superior de la máquina, ver Figura 38. Se decidió hacer un estudio de elementos finitos para ver como se comporta la estructura con los refuerzos que se le hicieron, en la Figura 39, se presentan los resultados gráficos de los estudios estáticos de la estructura, para este estudio fueron aplicadas 2 fuerzas de 2000 N cada una, en las áreas donde los actuadores neumáticos están ejerciendo el trabajo. Para poder llevar a cabo el estudio de elementos finitos se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Se realizó un análisis estático.
- Las magnitudes de las fuerzas aplicadas son de 2000N.

- Los puntos de aplicación de las fuerzas estarán situados donde van a ir ubicados los cilindros neumáticos.
- Las caras de sujeción serán las de la parte inferior del bastidor y platinas donde van los actuadores.



Figura 38. Estructura reforzada. Comparación del diseño en CAD y como quedo en realidad, las partes señaladas en azul en el modelo de CAD son los refuerzos.

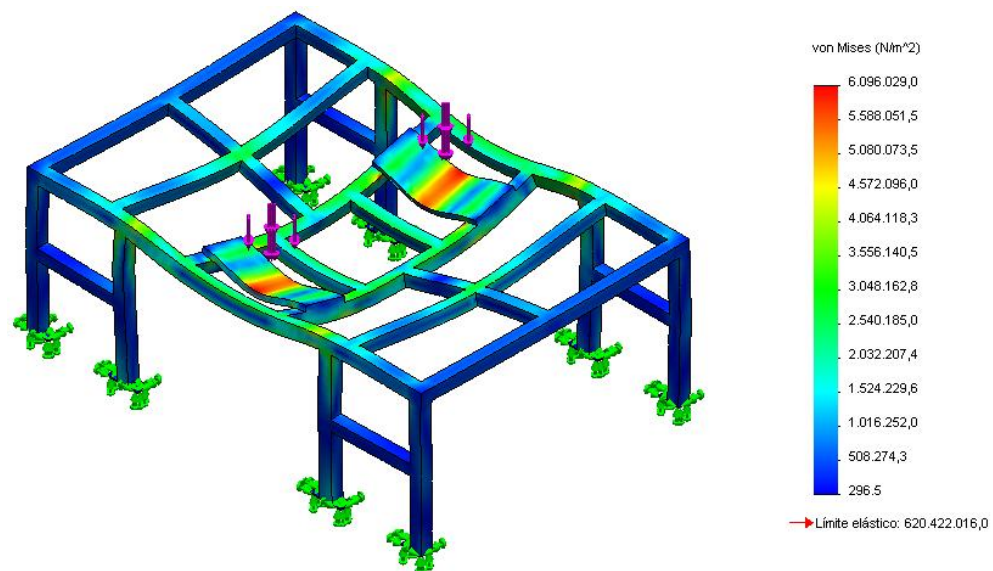


Figura 39. Análisis de elementos finitos a la parte superior del bastidor.

A continuación en la tabla 4, se analizan los resultados de los análisis de elementos finitos de la parte superior del bastidor sin refuerzos, con los resultados del estudio de elementos finitos del bastidor con refuerzos.

<b>ESTUDIO</b>	<b>ESTRUCTURA SIN REFUERZO</b>	<b>ESTRUCTURA REFORZADA</b>	<b>PORCENTAJE DE REDUCCIÓN</b>
<b>Tensión Von Mises (<math>N/m^2</math>)</b>	7.983.648	6.096.0290	25%
<b>Desplazamiento (mm)</b>	0,1225	0,08182	66,8%
<b>Deformación Unitaria Equivalente</b>	2,519 e-5	1,763 e-5	69,98%

Tabla 4. Tabla comparativa de resultados de los análisis de elementos finitos entre la estructura sin refuerzo y La estructura con refuerzo.

Comparando los resultados de los dos estudios de elementos finitos, se puede observar que hubo una disminución significativa en los esfuerzos analizados en los diferentes estudios que se realizaron, se puede concluir que hubo una reducción de esfuerzos en un 53% con respecto a la estructura antes de ser modificada. Esto nos permite garantizar dos cosas muy importantes, la primera es que al momento de que el ensayo se esté llevando a cabo los esfuerzos generados por el movimiento de las prensas no desvíen la estructura, y la segunda es que en el momento en que se decida implementar un tercer actuador como está planteado en trabajos futuros, la estructura soporte las cargas producidas por el tercer actuador.

### 2.3.3 Aislamiento Térmico

Otro problema descrito anteriormente es el desgaste generado por las resistencias que están soportadas por las láminas internas que van unidas al bastidor, para solucionar este inconveniente, se estudiaron las propiedades del Asbesto las cuales cumplían los requerimientos, además de ser un material económico, soporta altas temperaturas y es fácil de manejar. Por lo tanto fueron ubicadas 3 capas de lamina de asbesto de 1/16" de pulgada, en las sujeciones se pusieron 7 capas de lamina, esto para evitar que la resistencia estuviera en contacto directo con el material aislante, en la Figura 40 se puede apreciar la implementación de la solución.



Revestimiento  
de asbesto

Figura 40. Revestimiento de Asbestos para evitar quemar las láminas del interior.

### 2.3.4 Motor Trifásico

Debido a que el motor va a estar sometido a una tensión de 220V, es necesario hacer una conexión tipo triángulo o delta, ver Figura 41. La conexión tipo estrella también puede ser utilizada, pero debido a que este tipo de conexión requiere de mucha más potencia, el consumo de energía va a ser mayor, mientras que el tipo de conexión tipo delta el consumo de corriente va a ser menor.

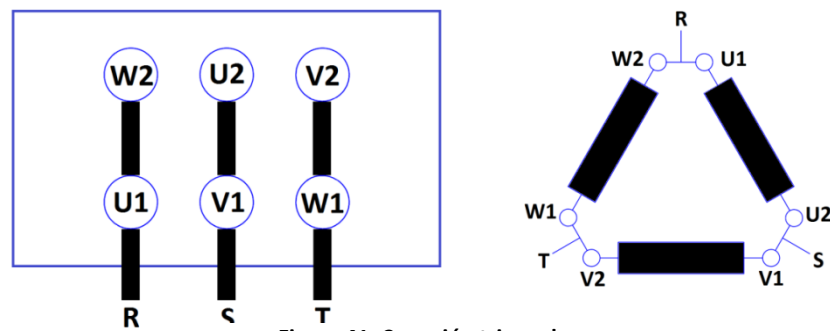


Figura 41. Conexión triángulo.

### 2.3.5 Variador de Velocidad

Fue necesario reconfigurar el variador de velocidad, debido a que antes estaba configurado en modo de operación manual, que para efectos de la implementación de un sistema automatizado no era efectivo. Se configuro el variador de tal manera que desde un dispositivo externo se tuviera control sobre éste, para ello fue tomado como referencia el manual técnico del proveedor, ver Figura 42. En la tabla 5 se muestra los parámetros de programación para que el variador de velocidad pueda recibir una señal externa de control y pueda variar la frecuencia de acuerdo a ésta señal de control.

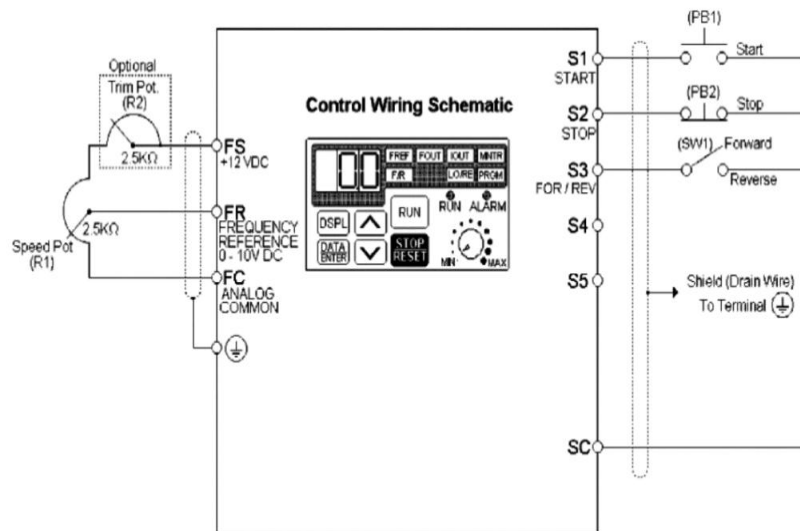


Figura 42. Configuración variador [24].

#### Operación:

- Al cerrar el pulsador (PB1) momentáneamente, mientras este cerrado el pulsador (PB2), va a arrancar el motor. [24]
- Al abrir el pulsador (PB2) en cualquier momento, el controlador detendrá el motor.
- Si el switch (SW1) está abierto, el motor gira hacia un sentido, y si (SW1) está cerrado el motor girará en la otra dirección. [24]
- La frecuencia de referencia es proporcional al nivel DC de la señal de entrada en el terminal FV. [24]

Parámetros	Nombre	Opción de ajuste
n01	Parámetro de selección / Inicializar	11: Inicializar a 3 líneas de control
n02	Selección del método de operación	1: Terminal
n03	Selección de la Referencia	2: Voltaje de referencia (0 a 10V)
n16	Tiempo de aceleración	2 segundos
n17	Tiempo de desaceleración	2 segundos

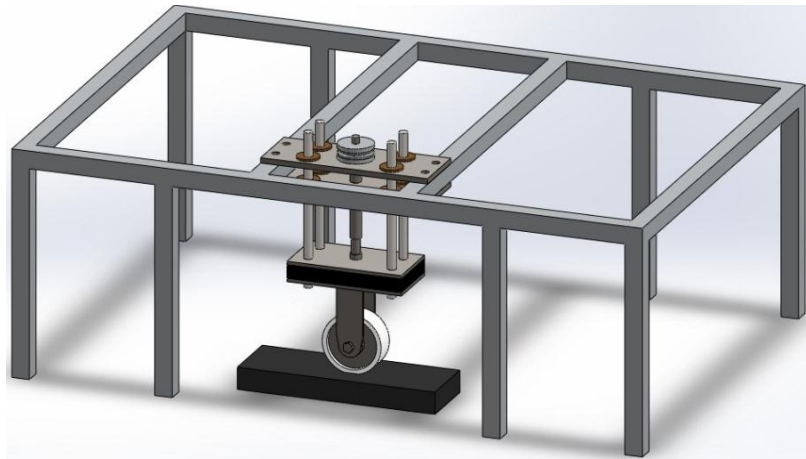
Tabla 5. Parámetros para la programación del variador de velocidad [24].



### 2.3.6 Cilindros neumáticos

Con los resultados de la sección 2.2.6, se obtiene la capacidad de tomar decisiones acerca de las posibles soluciones a implementar. A continuación se analizarán las posibles correcciones a implementar.

La solución que se plantea para corregir el problema de fatiga de los vástagos tiene como principio distribuir las fuerzas que actúan sobre estos en toda la estructura, esto con el objetivo de reducir las concentraciones de esfuerzos en el punto de fatiga o punto de falla. Para lograrlo se dispondrá de cuatro barras alrededor de cada vástago, estas barras irán acopladas por medio de bujes a la estructura principal permitiendo que las barras suban y bajen según sea el caso del ensayo, también permitirán ser un conductor de fuerza para que finalmente se disperse sobre la estructura principal. El modelo que se plantea se muestra en la Figura 43. Ver Anexo 2.

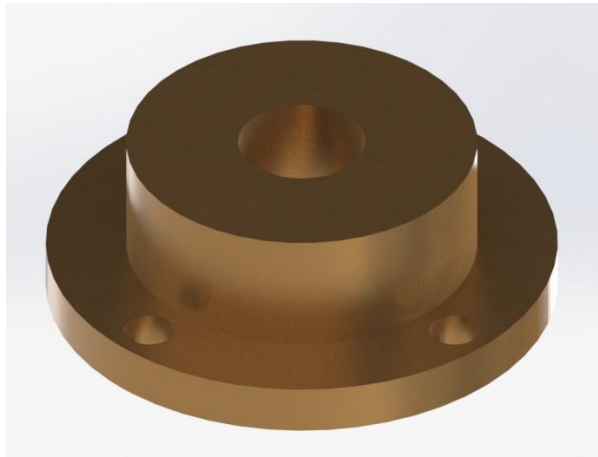


**Figura 43. Estructura con los refuerzos propuestos.**

Las partes del sistema que se desea implementar para disminuir los esfuerzos en el vástago son las siguientes:

- Bujes, los bujes tienen dos funciones fundamentales, una es garantizar la linealidad de las cuatro barras para que ninguna se vaya a desviar impidiendo un movimiento fluido, y la segunda es que sirvan como guía de deslizamiento para las barras. Se propone como material para la fabricación de los bujes el bronce fosforado, debido a que sus características mecánicas son óptimas para este tipo de trabajo, en la Figura 44 se puede observar el diseño CAD de los bujes. Ver planos Anexo 3.





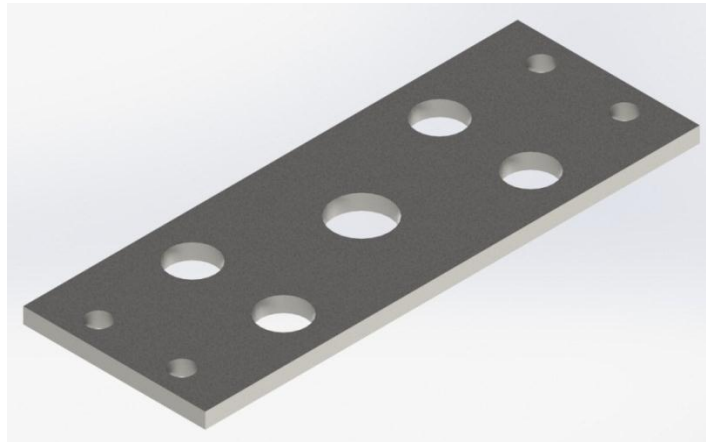
**Figura 44. Render del modelo en CAD del buje propuesto.**

- Barras de Acero Plata, estas barras son fundamentales en el diseño de refuerzo del vástago, estas barras son las encargadas de disipar los esfuerzos generados por la prensas en movimiento, se propone como material para la fabricación de las barras acero plata, este material cumple con las características mecánicas que se desean las cuales son muy similares a las de el acero AISI 4140, la ventaja que nos ofrece este material sobre el AISI 4140 es que las barras ya vienen rectificadas y vienen con un recubrimiento en cromo el cual nos ayuda a que no allá corrosión, sin contar que su distribución es común y los costos de este material son bajos. Ver CAD en la Figura 45 y ver planos Anexo 4.



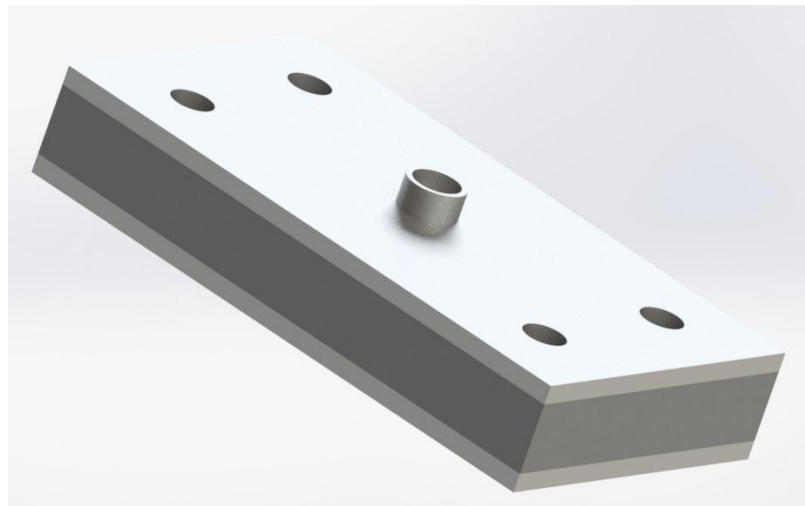
**Figura 45. Render del modelo en CAD de la barra de acero plata.**

- Platinas soporte de cilindros neumáticos, en estas platinas va a ir soportados los cilindros neumáticos y a la vez es donde van a ir ubicados los bujes por donde pasaran las barras, estas platinas tienen como función dar dirección y sentido a los cilindros. La máquina ahuelladora ya cuenta con estas platinas, pero no esta mecanizada como se propone en el CAD. Ver Figura 46, ver planos Anexo 5, 6.



**Figura 46.** Render del modelo en CAD de las platinas de sujeción de los cilindros neumáticos.

- Sistema de unión rueda-vástago, la función de este sistema como su nombre lo indica es unir el extremo del vástago del cilindro neumático, consta de dos platinas separadas por un rectángulo también fabricado por platinas, este sistema también es el encargado de sujetar las barras de acero. Para la fabricación de este mecanismo se propone platina de calibre de 12 mm de espesor en laminas HR. En la Figura 47 se puede apreciar este sistema. Ver planos Anexo 7, 8.



**Figura 47.** Render del modelo en CAD de ensamble mecánico que une la rueda con el vástago.

Teniendo en cuenta la solución planteada, se proponen tres variantes para el diseño original, estas modificaciones consisten en variar los diámetros de las barras de acero con el fin de estudiar las deformaciones tanto de vástago como las de las barras, para así poder analizar y tomar decisiones acerca de cual es la solución que nos brinda mayores beneficios y cual será el costo de fabricación de la solución seleccionada.

En la tabla 6 se puede observar los resultados de los diferentes diseños propuestos, junto a estos resultados, también están los resultados del estudio de elementos finitos que se realizó a la estructura sin refuerzos, esto tiene como finalidad comparar los resultados anteriormente obtenidos con los resultados de la estructura sin refuerzos para poder seleccionar la que mejores características mecánicas obtenga.

Para seleccionar el diseño adecuado, se tomo como referencia los resultados de los análisis del cilindro sin refuerzos, si se tiene en cuenta los tres tipos de análisis de elementos finitos, se obtiene que para las barras de  $\frac{1}{2}$ " en el caso de las tensiones se tiene una reducción del 10.9%, en los desplazamientos, un 21.4% de reducción y en las deformaciones un 8.74% de reducción respecto al vástago sin refuerzos.

Con la barra de  $\frac{3}{4}$ " se obtuvo una reducción de 26.6% en las tensiones, una reducción de 51.61% en los desplazamientos y una reducción de 28.84% en las deformaciones, con respecto a la estructura sin refuerzos. Para la barra de 1" se obtuvo una reducción de 28.38% en las tensiones, 55.62% de reducción en los desplazamientos y 32.53% de reducción en las deformaciones.

Analizando los porcentajes de reducción obtenidos, los que mayor reducción tuvieron fueron los de las barras de  $\frac{3}{4}$ " y 1", siendo estos dos muy similares en porcentajes, por lo tanto el diseño seleccionado para reforzar el vástago del cilindro fue el de las barras de  $\frac{3}{4}$ ". Se llego a esa conclusión debido a que no existe una diferencia grande entre los resultados de las dos soluciones propuestas.

<b>RANGO DE LOS MAXIMOS VALORES ALCANZADOS</b>			
<b>BARRAS DE ACERO(<math>\phi</math> pulgadas)</b>	<b>TENSIONES VON MISES (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>DESPLAZAMIENTOS URES(mm)</b>	<b>DEFORMASIONES UNITARIAS ESTRN(N-m/m<sup>3</sup>)</b>
<b>1/2</b>	76,113160 – 114,169752	$3.042e^{-1} - 3.550e^{-1}$	$7.907e^{-4} - 1.186e^{-3}$
<b>3/4</b>	66,166448 – 99,249672	$1.544e^{-1} - 1.930e^{-1}$	$7.189e^{-4} - 1.078e^{-3}$
<b>1</b>	64,262296 – 96,393440	$2.030e^{-1} - 2.368e^{-1}$	$5.759e^{-4} - 8.638e^{-4}$
<b>Sin Refuerzos</b>	85,493360 – 128,240048	$3.918e^{-1} - 4.478e^{-1}$	$9.283e^{-4} - 1.238e^{-3}$

Tabla 6. Resultados de los análisis de elementos finitos para los diferentes diámetros de barras de acero.

## 2.4 Procesos de fabricación

### 2.4.1 Fabricación del diseño propuesto

Para la fabricación de las piezas del diseño propuesto, fue necesario usar técnicas avanzadas de manufactura, CAM (Computer Aided Manufacturing) o en español manufactura asistida por computadora, ésta es una herramienta que permite fabricar

piezas por medio de programación en maquinaria de control numérico, es así, como se usaron tornos y fresas de control numérico para el mecanizado de algunas partes, debido a la gran precisión que se necesitaba a la hora de su construcción. Otras partes en cambio, fueron necesarias mandarlas a construir y otras se fabricaron en el taller de la Universidad Militar Nueva Granada con maquinaria convencional. A continuación se describe el proceso de construcción.

- Bujes, los bujes fueron mandados a fabricar debido a que se necesitaba precisión en su construcción, el ajuste deslizante específico para que permita a las barras deslizarse sin ningún problema. Ver Figura 48.



**Figura 48. Buje real.**

- Barras de acero plata, estas barras fueron mecanizadas en el taller de la Universidad militar nueva granada con el torno de control numérico, no fue necesario rectificarlas debido a que la ventaja del acero plata es que ya están rectificadas, ver Figura 49.

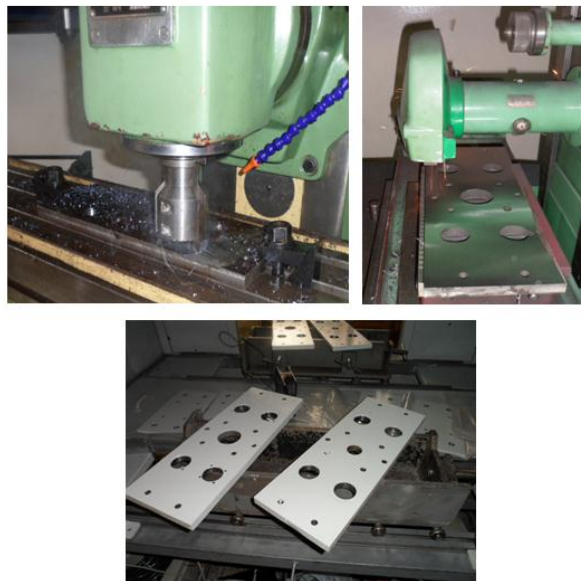


**Figura 49. Barras de acero plata. Mecanizado de roscado y redondeo.**

- Platinas de soporte de los cilindros neumáticos, las platinas para soporte ya las tenía la máquina ahuelladora, fue necesario hacerles las modificaciones propuestas para ubicar los bujes, primero con la fresa CNC se mecanizaron los huecos de diámetro de 35 mm, posteriormente se rectificaron, para este ultimo proceso fue necesario usar la fresa convencional y luego la rectificadora, finalmente se pintaron. Este proceso se puede ver en las Figuras 50 y 51, ver código de la fresa CNC, Anexo 9.



**Figura 50. Proceso de fabricación asistida por computador de las platinas de los cilindros neumáticos.**



**Figura 51. Proceso de rectificación de las platinas en maquinaria convencional.**

# 3 Automatización de máquina ahuelladora

---

En este capítulo se describirá el proceso que se llevo a cabo para la automatización de la máquina ahuelladora, primero se mostrará el nivel uno de la pirámide de automatización, el cual incluye los mecanismos, instrumentación, media y baja tensión que se implementaron en la máquina ahuelladora. Seguidamente se mostrará el segundo nivel de la pirámide de automatización el cual abarca los controles implementados en la máquina y la interfaz que interactúa con el usuario y la máquina.

## 3.1 Nivel I pirámide de automatización

De acuerdo con lo que se muestra en la pirámide del proceso de automatización, el nivel uno comprende los mecanismos o actuadores que intervienen en desarrollo del ensayo para medir la deformación plástica en mezclas asfálticas, la sensorica que permiten cuantificar las variables que intervienen, también se encuentran en este nivel, las señales que entregan estos sensores son procesadas por un dispositivo controlador que es el cerebro de toda la máquina. En ese mismo orden de ideas la máquina ahuelladora también cuenta con unos dispositivos de media tensión, estos son los encargados de alimentar los sensores, actuadores y electrónica del equipo, dispositivos como totalizador, contactores, fuente, botones de Start/Stop, paro de emergencia, entre otros, manejan las redes de monofásica (110 VAC) y trifásica (220 VAC) las cuales son necesarias por ejemplo en el manejo del motor trifásico con el que cuenta la máquina. Al igual que los elementos de media tensión, la máquina ahuelladora cuenta con un sistema electrónico de baja tensión, este conjunto de circuitos electrónicos o de baja tensión es el encargado de hacer la adquisición de datos, etapa de acondicionamiento de señales y enviar señales de control.

### 3.1.1 Mecanismos

- *Resistencias*, El horno tiene dos resistencias de 1800W de potencia que actúan sobre el sistema, con una alimentación de 220V, estas fueron conectadas en serie para reducir la corriente que consumen, ver Figura 52, cada una tiene un valor de 14.5 Ohm, esto significa una resistencia total de 29 Ohm, que a 220V, consumen 7.5A de corriente. El propósito con estas resistencias es calentar las muestras asfálticas que están sujetas en las prensas hasta llegar a temperaturas que oscilan entre 25°C como mínimo y máximo 60°C, estas temperaturas debido a las perdidas y al volumen de la cámara, se alcanzan en un tiempo de 10 y 60 minutos respectivamente.

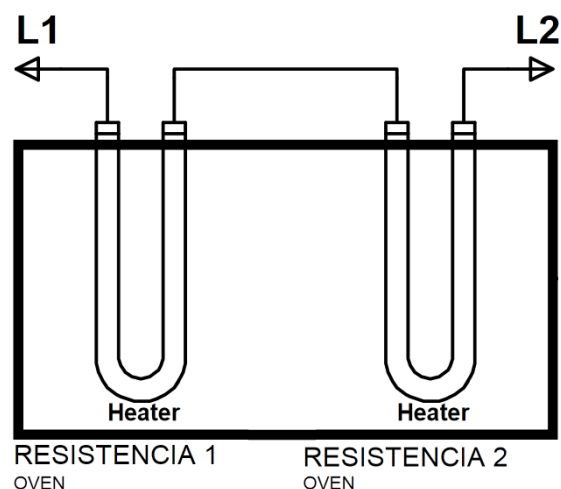
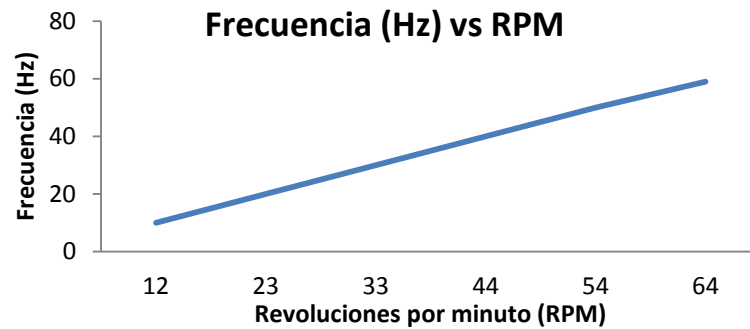


Figura 52. Diagrama en Proteus de la conexión de las resistencias.

- *Relé de estado sólido*, Para cambiar la activación o desactivación de las resistencias, se cuenta con un relé de estado sólido, que trabaja entre 24 – 380 VAC, a una corriente máxima de 40A, para este caso se utilizaran 220VAC/7.5A. El voltaje de activación del dispositivo es de 3 - 32 VDC, en ésta aplicación se polarizo con 12VCD, implementando un circuito de swicheo, con una señal digital de control.
- *Motor Trifásico*, Para el sistema de movimiento es fundamental contar con un elemento que permita tener movimiento rotacional, el motor trifásico con el que cuenta la máquina es un motor Nord de 1.5KW de potencia, 1725 revoluciones por minuto, trabaja con frecuencias entre 10Hz y 60Hz, éste también cuenta con un reductor de velocidad de 62/40; Se sometió al motor con reductor a diferentes pruebas y se obtuvieron los siguientes resultados, en la Tabla 7, se puede analizar dependiendo de la frecuencia de operación que suministra el variador de velocidad, el motor va a tener una velocidad angular en rpm y un torque determinado. La Frecuencia del motor fue modificada manualmente por medio del variador de velocidad Yaskawa GPD 305j7, solo para este estudio. En la Gráfica 1. Se puede analizar la relación entre la frecuencia del motor en el eje Y, y las revoluciones en el eje X.

Frecuencia (Hz)	RPM	Torque (Nm)	w(rad/s)
10	12	1193,66	1,25
20	23	622,78	2,40
30	33	434,05	3,45
40	44	325,54	4,60
50	54	265,26	5,65
59	64	223,81	6,70

Tabla 7. Caracterización Motor.



Gráfica 1. Frecuencia Vs Revoluciones por minuto.

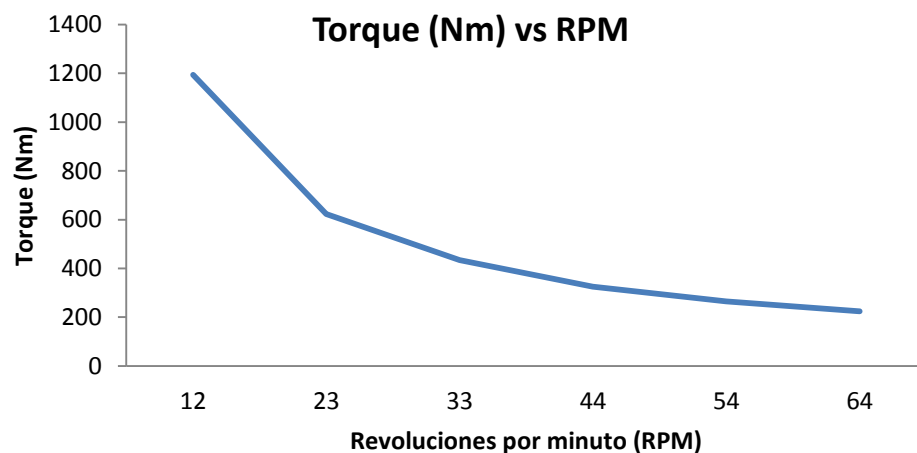
Las rpm fueron tomadas de una prueba práctica, variando la frecuencia del motor y contando las revoluciones que entrega el motor en 1 minuto.

Para hallar el torque del motor se implemento la Ecuación 7. Teniendo las rpm y sabiendo la potencia del motor que es de 1.5 KW, se remplaza en la ecuación y se obtiene el torque.

$$Potencia (Kw) = \frac{Torque(Nm) * 2\pi * rpm}{60000} \quad EC 7.$$

$$Torque(Nm) = \frac{1.5Kw * 60000}{2\pi * rpm} \quad EC 8.$$

En la Gráfica 2, se muestran los resultados de graficar el torque T y las RPM del motor. Es visible que a bajas revoluciones el torque va a llegar a su punto máximo, y a revoluciones altas el torque llega a su punto minino.



Gráfica 2. Torque vs Rpm del Motor.

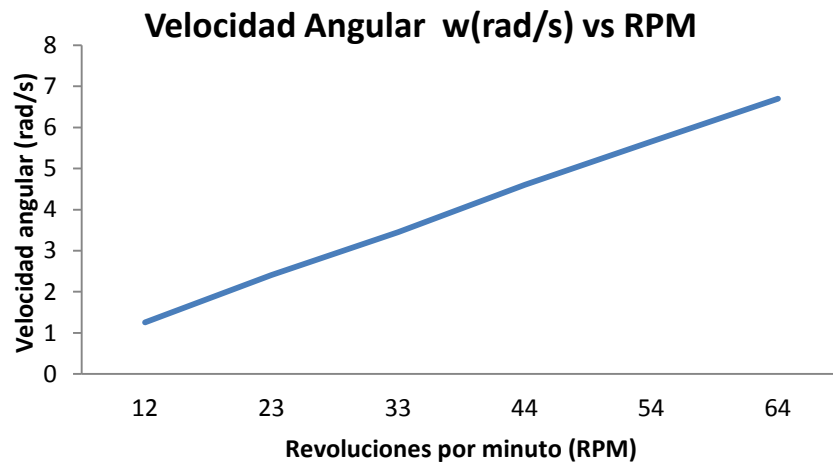


La velocidad angular fue calculada implementando la Ecuación 10. Teniendo las frecuencias de trabajo del motor, se aplica la ecuación 9 y se obtiene la velocidad angular.

$$1rpm = \frac{2\pi rad}{60 s} \quad \text{EC 9.}$$

$$w(rad/s) = \frac{60s * rpm}{2\pi} \quad \text{EC 10.}$$

En la Gráfica 3, se puede identificar que la relación entre la velocidad angular del eje del motor es lineal a las revoluciones por minuto.



Gráfica 3. Torque Vs RPM del motor.

- *Variador de velocidad*, El variador de velocidad, actúa sobre el motor trifásico variando la frecuencia de operación, entre 0 – 60Hz, como se explico en la seccion 3.3.5, el variador fue configurado para que se controlara desde un dispositivo externo, el cual modificando el voltaje de entrada al variador entre 0- 10 VDC, éste modificaría la frecuencia entre 0 – 60Hz respectivamente. También desde el controlador se dan las órdenes de encendido, apagado del motor, por medio del variador.
- *Actuadores Neumáticos*, Parte fundamental del sistema neumático de la máquina son los cilindros neumáticos, que son los que ejercen la fuerza necesaria para que las llantas hagan huella en las muestras de mezcla asfáltica, es por esto que se hizo un análisis y caracterización experimental de estos elementos. La máquina cuenta con dos cilindros de doble efecto, estos soportan una presión máxima de 16 Bares, el embolo es de 80mm de diámetro y un vástago con recorrido máximo de 100mm. En el Anexo 10 se muestra el diagrama neumático que actúa sobre los cilindros.

Se hace necesario caracterizar los cilindros neumáticos con el fin de tener conocimiento de su comportamiento a las diferentes presiones aplicadas en este. Para esto se hacen los cálculos necesarios para conocer las fuerzas máximas y mínimas que ejercen los actuadores, estos cálculos se hacen con respecto a la presión que suministra la red neumática. En la Figura 53 se puede observar un diagrama de como es la dirección de las fuerzas y el área de aplicación.

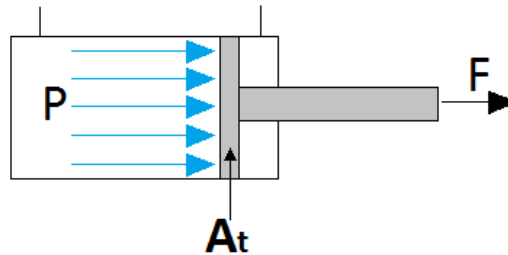


Figura 53. Actuador neumático doble efecto, la figura muestra la dirección de la fuerza y el área en donde es aplicada la presión.

Diámetro del embolo,  $D = 0.08\text{m}$   
 Radio del embolo,  $r = 0.04\text{m}$

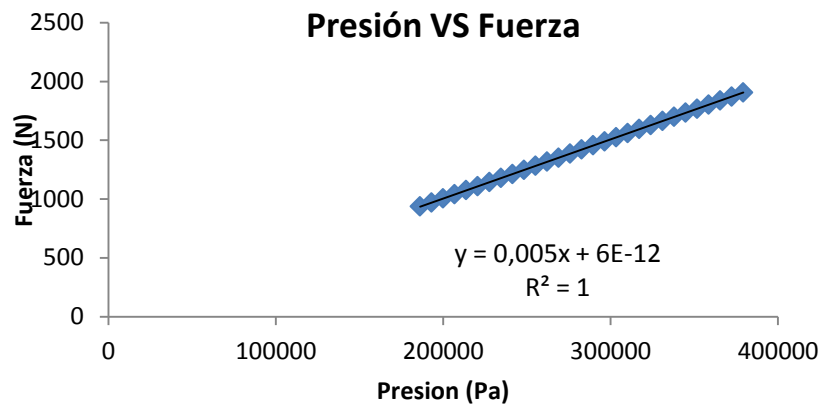
Teniendo en cuenta el radio del embolo es posible calcular el área transversal del embolo como se muestra en la ecuación 11.

$$At = \pi r^2 = \pi(0.04)^2 = 0.005026 \text{ m}^2 \quad \text{EC 11.}$$

La presión usada en el ensayo para determinar la deformación plástica en mezclas asfálticas, está especificada de acuerdo a los requerimientos del ensayo, la presión mínima usada es de 186159 Pa y la máxima de 379213 Pa [1]. De acuerdo con lo anterior, al haber calculado el área transversal del embolo del cilindro y conocer del rango de presiones usadas en el ensayo, se calcula el rango de fuerzas que ejerce el cilindro en las llantas, que es la misma fuerza que se aplica en la muestras de mezclas asfálticas. La ecuación 12 permite hacer el cálculo de estas fuerzas.

$$F = P * At \quad \text{EC 12.}$$

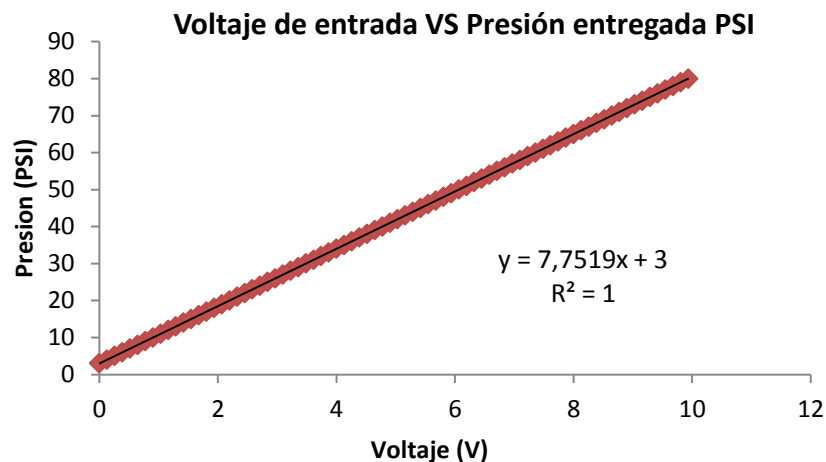
Con la ecuación 12 se obtiene una Fuerza mínima ( $F_{min} = 936\text{N}$ ) y una fuerza máxima ( $F_{max} = 1905\text{N}$ ), en la Gráfica 4 se muestra la relación entre presión (Pa) y la fuerza (N) con la que actúa el cilindro neumático. En la Gráfica 4, se observa la fuerza ejercida según la presión de entrada.



Gráfica 4. Relación presión Vs fuerza del cilindro.

- *Válvula reguladora de presión*, En la prueba de ahuellamiento, es necesario garantizar una presión constante y regulada durante el desarrollo del ensayo, para esto se implementó una válvula reguladora de presión neumática. Este dispositivo regula desde 0 PSI hasta 145 PSI, con una entrada de 0v-10v, directamente proporcional.

Según las especificaciones del ensayo se necesita regular desde 0 PSI hasta 80 PSI, con el fin de ampliar la resolución de la válvula reguladora, fue ajustado el zero y el span, obteniendo así regular la presión desde 3 PSI hasta 80 PSI, con una entrada de 0v a 10 v respectivamente, en la Gráfica 5 se puede ver como es la presión de salida con respecto al voltaje que es aplicado a la válvula.



Gráfica 5. Caracterización válvula reguladora de presión neumática.

### 3.1.2 Instrumentación

- *Termocuplas tipo J*, la máquina ahuelladora cuenta con cuatro sensores de temperatura que son termocuplas tipo J, estas sensan en un rango de 20°C a 60°C como lo especifica la prueba, la variación de voltaje individual de cada termopar está entre 1.019mV y 3.115mV respectivamente según la tabla característica para termocuplas tipo J, Ver Anexo 11, estos datos son con una temperatura de juntura fría en 0°C; como la juntura fría de las termocuplas van a estar a temperatura ambiente de 20°C aproximadamente, hay que sumar 1.019mV, al valor sensado. Aun así se tiene una variación muy pequeña individualmente, fue por esto que se decidió poner en serie los cuatro termopares, y de esta forma obtener una variación cuatro veces mayor, ver Figura 54.

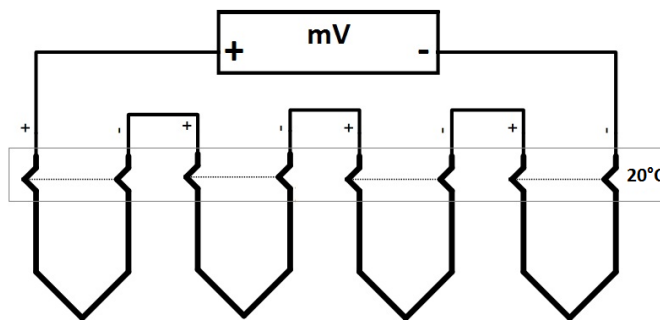
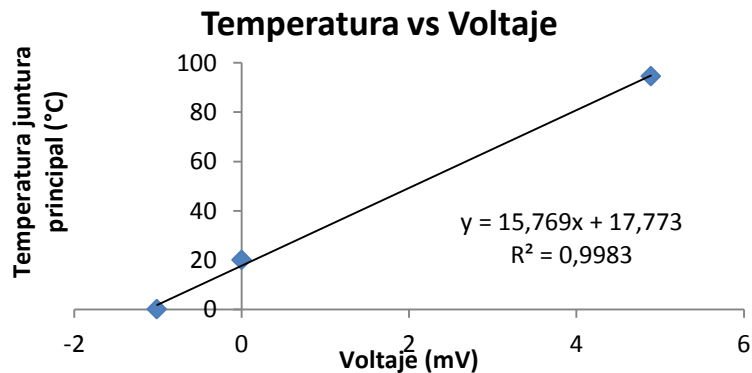


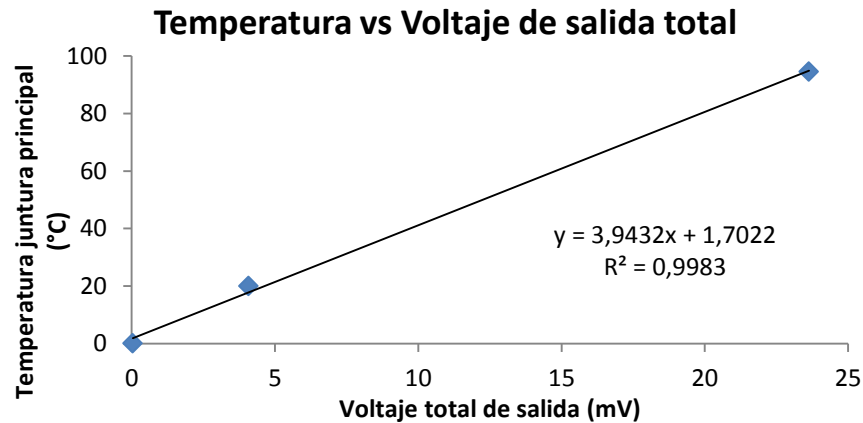
Figura 54. Conexión en serie de termocuplas tipo J.

Para caracterizar las termocuplas, fue necesario tener la juntura fría a una temperatura ambiente de 20°C e introducir la juntura principal en hielo, a una temperatura de 0°C obteniendo una lectura de -1.01mV, luego dejando la juntura principal a una temperatura de 20°C se obtuvo 0mV, y por ultimo fue introducida la juntura principal en agua hirviendo, sabiendo que el agua a la altura de Bogotá tiene una temperatura de ebullición de 94.5°C, se obtuvo una lectura de 4.89mV, esto se hizo para cada termopar, en la Gráfica 6 se puede ver la curva característica del sensor.



Gráfica 6. Voltaje de salida termocuplas vs temperatura de juntura principal, con una temperatura de juntura fría de 20°C.

A continuación en la Gráfica 7, se presenta la variación de las cuatro termocuplas conectadas en serie y con el ajuste de la temperatura de junta fría, es decir que a los valores obtenidos se les sumo 1.019mV que equivale a una temperatura de 20°C.



Gráfica 7. Relación entre voltaje de salida de las termocuplas y temperatura sensada.

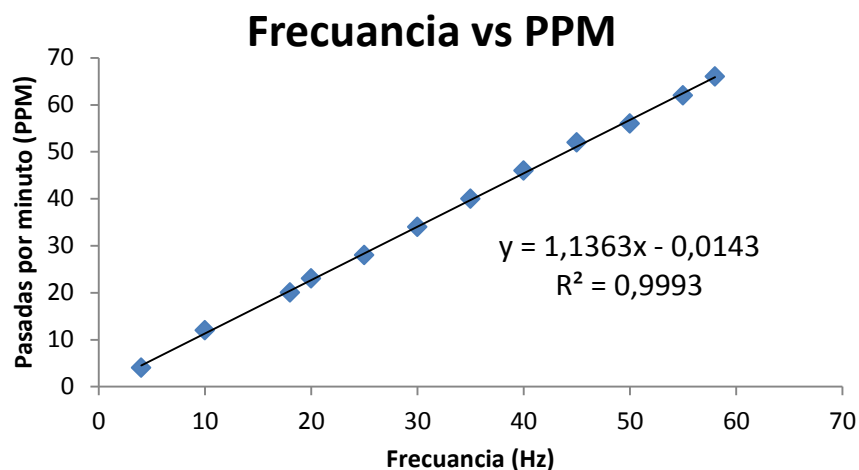
Como la temperatura necesaria para el ensayo es de 20°C a 60°C, en la tabla 8 se mostrará el voltaje que entregan las termocuplas conectadas en serie, con respecto a la temperatura en la que se encuentre la junta principal, con una temperatura de 20°C en la junta fría.

Temperatura (°C)	Salida Termocuplas (mV)
20	4,64
25	5,91
30	7,18
35	8,44
40	9,71
45	10,98
50	12,25
55	13,52
60	14,78

Tabla 8. Tabla de temperatura y voltaje de salida de las termocuplas.

- *Sensor efecto hall*, Con el sensor de efecto hall, que cambia de estado al acercarse un imán de alta capacidad, se cuenta la cantidad de pasadas por minuto (PPM) que hacen las prensas, esto varía dependiendo de la frecuencia que el variador de velocidad este entregando al motor, al hacer la caracterización del sistema con el sensor, se determinó que cuando las prensas hacen un movimiento de va y ven

completo, el motor da una revolución, en pocas palabras se está controlando las revoluciones por minuto del motor, pero tomando como referencia las pasadas de la máquina. A continuación se presenta la relación entre frecuencia del motor y pasadas por minuto de las prensas. Ver Gráfica 8 y Tabla 9.



Gráfica 8. Relación frecuencia y pasadas por minuto del sistema de movimiento.

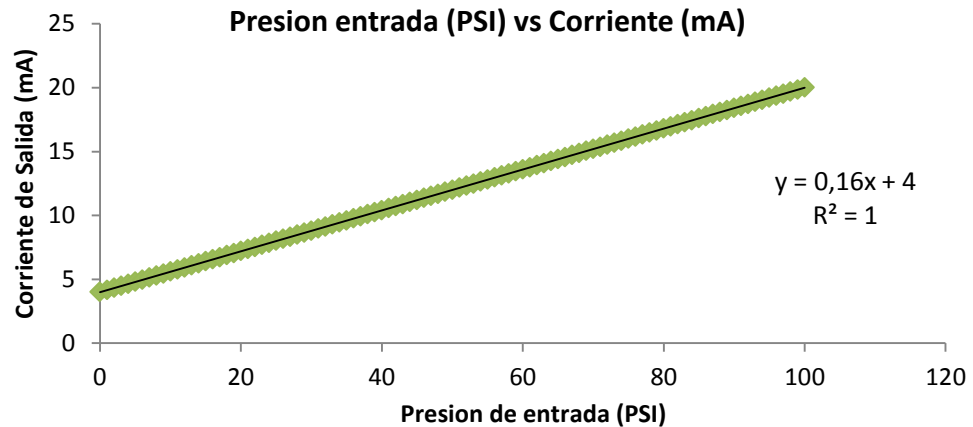
Frecuencia (Hz)	Pasadas por minuto (PPM)
4	4
10	12
18	20
20	23
25	28
30	34
35	40
40	46
45	52
50	56
55	62
58	66

Tabla 9. Frecuencia y PPM del sistema de movimiento.

El sensor está ubicado en un extremo del recorrido de las prensas, cuando la prensa llega al sitio del sensor, este cierra su contacto y se produce una señal digital en alto, que es capturado por una interrupción externa configurada en el microcontrolador.

- *Sensor de presión*, El ensayo requería de un sistema de control neumático de lazo cerrado, con el fin de asegurar una presión constante de entrada a los actuadores

neumáticos, para esto fue implementado un sensor transductor de presión marca NOSHOK serie 300, con una entrada de 0 PSI a 100 PSI, entregando una señal de corriente de 4 mA a 20 mA, ver Gráfica 9, para mayor información sobre las especificaciones del sensor ver Anexo 12.



Gráfica 9. Relación entre la presión de entrada al sensor y la señal de salida del mismo.

- *Sensores lineales*, la máquina ahuelladora cuenta con dos sensores lineales del modelo HS25, estos sensores son de salida tipo *Strain Gage*, lo cual indica que tienen una variación de la resistencia, por lo tanto este sensor entrega una variación de voltaje de acuerdo a la variación que tenga la resistencia. Estos sensores son usados para medir la deformación de las muestras de mezclas asfálticas durante el ensayo, un sensor para cada probeta, el sensor modelo HS25 tiene un recorrido máximo de 26mm, trabaja con una alimentación de 2 a 10 VDC. Con una alimentación de 10VDC el sensor entrega una señal de 0mV – 62mV, con ésta conexión se garantiza mayor resolución de voltaje por milímetros de desplazamiento en la Figura 55 se muestra el sensor.



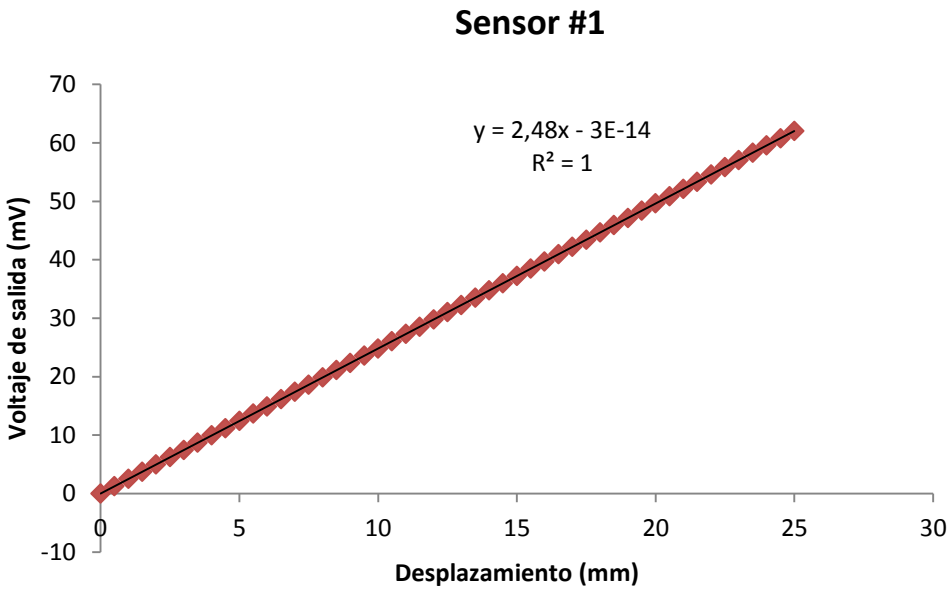
Figura 55. Modelo en CAD del sensor lineal HS25.

Para la caracterización de estos sensores, se tomo como voltaje de entrada o de alimentación 10V, este voltaje de alimentación permite tener un mayor rango de precisión, los instrumentos usados para su caracterización fueron un micrómetro con el cual se variaba la distancia, y un multímetro *BK Precision*. Estos instrumentos permiten mediciones precisas, en el caso del micrómetro, se puede medir micras de milímetro y en el caso del multímetro, se uso este porque los sensores entregan medidas del orden de mV. Se realizó el mismo proceso para cada uno de los sensores debido a que los estos ya habían sido usados, por lo tanto no se garantiza la linealidad y el mismo comportamiento para los dos. En la

tabla 10 se muestra la salida de los sensores, en mili voltios. En las Gráficas 10 y 11, se muestra la curva de la respuesta de cada sensor.

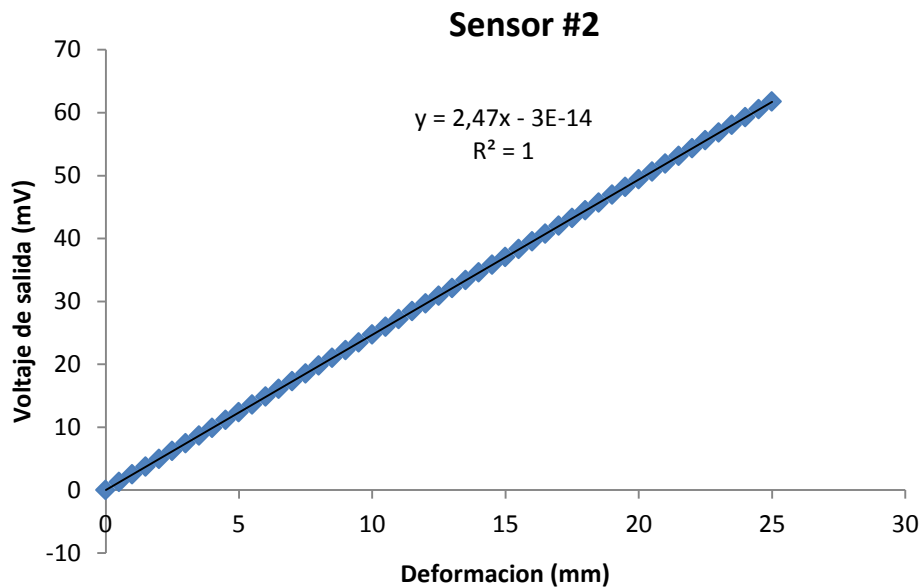
Desplazamiento (mm)	Sensor #1 (mV)	Sensor #2 (mV)
0	0	0
2	4,96	4,94
4	9,92	9,88
6	14,88	14,82
8	19,84	19,76
10	24,8	24,7
12	29,76	29,64
14	34,72	34,58
16	39,68	39,52
18	44,64	44,46
20	49,6	49,4
22	54,56	54,34
24	59,52	59,28
25	62	61,75

Tabla 10. Desplazamiento en milímetros y salida en mili voltios de los sensores HS25.



Gráfica 10. Desplazamiento Vs Voltaje sensor 1.





Gráfica 11. Desplazamiento Vs Voltaje sensor 2.

De los resultados obtenidos se puede concluir que los sensores tienden a un comportamiento lineal del desplazamiento respecto al voltaje de salida, con lo cual se puede concluir una resolución para cada sensor, que en el caso del sensor 1 es de 2.450 mV por milímetro y para el sensor 2 es de 2,428 mV por milímetro.

### 3.1.3 Media tensión

La máquina ahuelladora cuenta con una serie de mecanismos y sensores que necesitan ser alimentados, ya sea con voltajes de corriente directa o con voltajes de corriente alterna, por lo tanto se necesitó de una red trifásica junto con un neutro con el fin de usar una fase de la red trifásica para red monofásica. Para el manejo de estas redes se diseñó un tablero eléctrico que interconecta los elementos que componen el circuito eléctrico de media tensión, a continuación en la Figura 56 se muestra el tablero eléctrico de la máquina ahuelladora. En el Anexo 13 se puede ver el esquema eléctrico de la máquina ahuelladora.

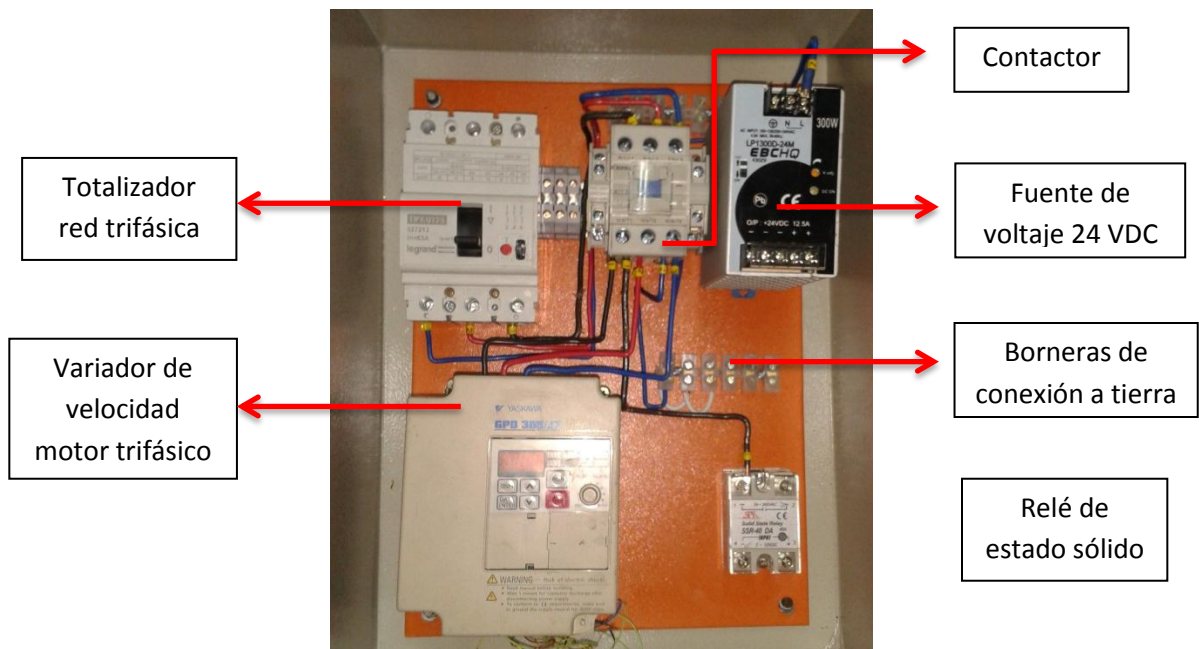


Figura 56. Conexiones y elementos del tablero eléctrico de la máquina ahuelladora.

- *Totalizador*, a este elemento se encuentra conectada la red trifásica, el totalizador es de marca LEGRAND, maneja una tensión entre 220VAC y 340VAC y tiene una corriente máxima de corte de 40A, ésta es regulable entre 30A y 40A, el totalizador es el encargado de energizar el tablero eléctrico, este cuenta con dos testigos en la parte frontal del tablero, uno verde y uno rojo, el testigo rojo se enciende cuando el totalizador se encuentra en modo ON, es decir que el tablero está energizado.
- *Circuito de retención*, para el manejo de los botones de Start/Stop y paro de emergencia, aislamiento entre los circuitos electrónicos y etapa de media tensión, se diseñó un circuito de retención que permite arrancar o parar la máquina. Este circuito de retención es el encargado de energizar el variador de velocidad, la fuente DC, el relé de estado sólido y la etapa de control de la máquina ahuelladora. Este circuito lo maneja principalmente el contactor, el cual cuenta con contactos 2NC y 2NO y la activación de la bobina es a 110VAC, al presionar el botón de Start, la bobina se activa y da paso a la red monofásica que alimenta otros elementos y a la vez el testigo de color verde se enciende y el de color rojo se apaga.
- *Elementos de seguridad*, con el fin de garantizar la seguridad del equipo y personal en caso de emergencia, fue implementado un botón de paro de emergencia, éste está ubicado sobre la máquina ahuelladora en un lugar visible y de fácil acceso el cual pueda ser accionado fácilmente en caso de alguna emergencia, este botón des-energiza toda la etapa de media y baja tensión haciendo que la máquina se detenga inmediatamente. También para efectos de prevención fue instalada una baliza, ésta es la encargada de dar una señal visible al usuario de que la máquina está en funcionamiento o se encuentra detenida, la baliza cuenta con dos colores, rojo y verde indican que se está realizando el

ensayo es decir que hay que tener precaución porque está en movimiento, y la luz de color verde indica que la máquina está encendida pero aun no se a iniciado el ensayo. En la Figura 57 se muestran estos elementos.



Figura 57. Máquina con elementos de seguridad, botón de paro de emergencia y baliza.

- *Ventilado y lámpara*, la máquina ahuelladora cuenta con dos elementos indispensables al interior de la misma que se manejan con la red monofásica de 110VAC, estos elementos son el ventilador y la lámpara. El ventilador es usado para generar una corriente de aire al interior de la máquina que permita mantener una temperatura uniforme, y la lámpara de neón que ilumina el interior de la máquina cuando las condiciones de luz son escasas o cuando el usuario lo desee.

### 3.1.4 Baja tensión

Una etapa principal en el proceso de automatización es la adquisición de señales de los sensores y la generación de señales de control a los mecanismos, de tal manera que se diseñaron tres circuitos electrónicos con el fin de poder procesar los datos y enviar señales de control. Uno de los circuitos electrónicos y el principal es el de control, un segundo circuito es el de amplificación y acondicionamiento de las señales de los sensores y un tercero que es el encargado de activar los relés que conmutan las señales de control y la red de media tensión.

- *Circuito de control*, el circuito de control como se mencionó anteriormente, es el principal entre los tres circuitos electrónicos diseñados, este cuenta con un microcontrolador Microchip PIC 18F4550, el PIC es el encargado de comunicar la máquina ahuelladora con el PC por medio del protocolo RS232, además de esto, el microcontrolador es el encargado de hacer la conversión análogo-digital de cuatro sensores, maneja la LCD alfanumérica de 16x2, genera dos señales PWM, una para el variador de velocidad y otra para la válvula reguladora de presión, y genera las señales de control que son enviadas a los actuadores y relés. En

consecuencia de lo anterior, el circuito de control es el cerebro de la máquina ahuelladora. En el Anexo 14 se muestra el esquema circuito electrónico de control.

Debido a que la máquina ya no cuenta con la tarjeta de adquisición de datos de NI, se decidió escoger el microcontrolador previamente mencionado, el cual cumple con las siguientes características:

- Tiene dos módulos PWM.
- Tiene 13 canales de conversión análogo-digital.
- Cuenta con un modulo USART.
- Tiene más de 20 salidas y entradas digitales.

Como se dijo anteriormente el circuito de control cuenta con comunicación serial, el dispositivo usado es una tarjeta que usa el integrado FT232RIL, este hace una conversión serial USB-USART. Se alimenta directamente de puerto USB utiliza un puerto Mini USB para conectarse al computador, la tarjeta posee dos regletas de 9 pines para que pueda ser usada en protoboard, en el Anexo 17 se muestra la tarjeta a detalle.

- *Circuito de acondicionamiento*, debido a que la señal que entregan algunos sensores como los sensores lineales y las termocuplas es de mV, fue necesario diseñar una etapa de amplificación y acondicionamiento de estas señales, también se hizo acondicionamiento a la señal digital que entrega el sensor de efecto hall, para garantizar el estado en alto y el estado en bajo, con el fin de que el microcontrolador no tuviera lecturas erróneas en cualquiera de los dos estados en que se encuentre el sensor. De igual manera se hizo acondicionamiento a la señal que entrega el sensor de presión, debido a que estos entregan una variación de corriente entre 4mA y 20mA; para poder hacer la lectura de ésta señal de tal manera que el microcontrolador pudiera hacer la conversión análogo-digital fue necesario poner una resistencia en serie a la salida de ésta señal, para que la variación fuese en voltaje. En el anexo 15 se muestra el esquema del circuito de acondicionamiento.

A continuación se describen algunos de los amplificadores y etapas de acondicionamiento usadas en el circuito de acondicionamiento.

- Debido a que la magnitud de la señal de las termocuplas es del orden de mV, es necesario hacer una etapa de acondicionamiento y amplificación, en este caso se realizaron dos etapas. Se implemento un amplificador de instrumentación AD626, ya que este nos ofrece una gran ventaja, la cual es que no necesita polarización de voltaje negativo, además de esto, se investigo acerca de este amplificador y se llego a la conclusión de que este es utilizado en aplicaciones con termocuplas tipo J. En la Tabla 11 se puede ver los resultados de la primera etapa de amplificación.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Salida Termocuplas (mV)</b>	<b>Salida Acondicionamiento (mV)</b>
20	4,64	19,83771992
25	5,91	22,85587351
30	7,18	25,8740271
35	8,44	28,89218069
40	9,71	31,91033428
45	10,98	34,92848787
50	12,25	37,94664146
55	13,52	40,96479505
60	14,78	43,98294864

**Tabla 11. Tabla comparativa de la etapa de acondicionamiento de las termocuplas.**

Después de hacer ésta etapa de acondicionamiento de la señal de las termocuplas, la salida sigue siendo muy baja para que el canal de conversión análogo digital del microcontrolador alcance a hacer una lectura correcta, es por esto que se procedió a hacer una segunda etapa con un amplificador LM 324, esta etapa tiene una ganancia de  $A=67$ .

La salida  $V_o$  de este amplificador va al microcontrolador para que este se encargue de realizar la conversión análogo-digital. Después de haber implementado la segunda etapa, los resultados se pueden ver en la Tabla 12, aquí se muestra la salida en voltaje de las termocuplas que va a ingresar en el canal de conversión análogo digital del microcontrolador.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Salida Termocuplas (mV)</b>	<b>Salida etapa de amplificación (V)</b>
20	4,64	1,33
25	5,91	1,53
30	7,18	1,73
35	8,44	1,94
40	9,71	2,14
45	10,98	2,34
50	12,25	2,54
55	13,52	2,74
60	14,78	2,95

**Tabla 12. Voltaje de salida de la etapa de amplificación.**

- Para la etapa de amplificación de la señal de los sensores lineales se utilizó un amplificador de instrumentación LM324, la ventaja que ofrece este amplificador, es que en un solo integrado tiene cuatro amplificadores totalmente independientes y el voltaje que necesita para su operación es únicamente positivo. El tipo de amplificador usado para estos sensores fue un amplificador diferencial, debido a que la salida de este tipo de sensores es *Strain Gage*. El cálculo para hallar el valor de las resistencias y tener una ganancia adecuada se describe a continuación.

$$R_3 = R_1 \text{ y } R_4 = R_2$$

$$V_O = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)(V_1 - V_2)$$

- El sensor de efecto hall funciona como un interruptor normalmente abierto, al acercarse el imán cambia de estado y cierra el circuito, en la aplicación de la máquina ahuelladora el sensor cuenta una pasada por minuto, es decir que cuando las prensas van y vuelven el sensor cierra el circuito contando una pasada. En ese mismo orden de ideas el sensor fue configurado con el fin de que este entregue una señal de un cero lógico o un uno lógico, normalmente abierto y normalmente cerrado respectivamente, para que el microcontrolador usara un pin como entrada digital y se activara la interrupción internamente. Debido a la gran distancia que existe entre la ubicación del sensor y la ubicación de la etapa de control, la señal de este se distorsionaba enviando así lecturas incorrectas; para solucionar este problema se implementó un filtro pasa-bajos el cual garantiza que la señal que entregue el sensor sea la correcta. En la Figura 58 se muestra el esquema del circuito con el filtro pasa-bajo.

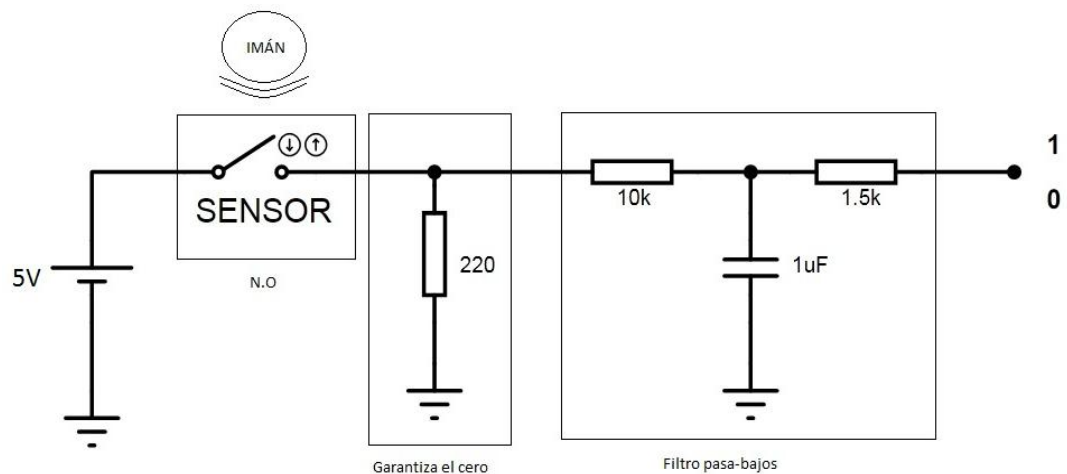


Figura 58. Esquema electrónico del sensor de efecto hall con el filtro pasa-bajo.

- Por último para el acondicionamiento de la señal del sensor de presión, fue necesario conectar una resistencia de 220 ohm, con el fin de que la señal que interpreta el microcontrolador fuese una variación de voltaje para que este pudiese hacer la conversión análogo-digital, ya que este nos entrega una señal entre 4-20mA. En la Figura 59 se muestra el esquema de este acondicionamiento.

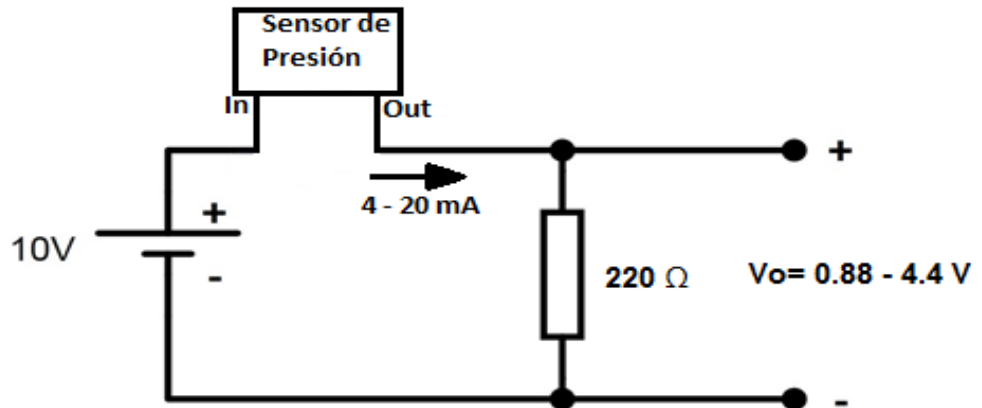


Figura 59. Etapa de acondicionamiento del sensor de presión.

- *Circuito de electrónico de potencia*, teniendo en cuenta que algunos elementos como los relevos necesitan señales de activación a 10, 12 o 24 VDC, fue necesario diseñar un circuito electrónico de potencia, para esto se realizó una configuración de transistores que permiten amplificar la señal de control del microcontrolador que es de 5VDC al voltaje necesario de activación. Este circuito también permite hacer el cambio de la señal de control a la etapa de media potencia, como es el caso del encendido o apagado de la lámpara de neón, debido a que ésta se enciende con un voltaje de 110VAC, la señal de control para la activación de ésta se envía a un relv, que es el encargado de dar paso a la red monofásica para que encienda la lámpara de neón o apague según sea el caso. En el Anexo 16 se muestra en detalle el esquema electrónico.

## 3.2 Nivel II pirámide de automatización

Siguiendo con los niveles que propone la pirámide de automatización, el nivel II comprende el control de las variables que intervienen en el ensayo para determinar la deformación permanente en mezclas asfálticas, este control fue implementado en el microcontrolador, para ver el código de programación de este, ver Anexo 18. También se desarrollo la interfaz de la máquina ahuelladora que interactúa con el usuario. A continuación se explica como se realizó este proceso.

### 3.2.1 Control sistema de temperatura

Para este sistema se busca obtener un controlador clásico, que tenga un margen de error mínimo, y que responda adecuadamente con las variaciones externas durante la prueba, para esto se identificara el sistema usando la herramienta Ident de Matlab, aproximando el sistema a una función de transferencia.

La cámara de temperatura de la máquina ahuelladora tarda aproximadamente 1h en llegar a su temperatura máxima que es 60°C. Durante este tiempo se tomaron datos cada 12 segundos, de la entrada a las resistencias, es decir el estado en el que se encontraba, si era encendido o apagado (0v – 5v) y la salida de voltaje de las termocuplas. En total fueron 300 datos los cuales se pusieron a oscilar para que la identificación funcionara adecuadamente.

Se aproximó el sistema a una función de primer orden y a una de segundo orden. La función de primer orden presenta una respuesta exponencial decreciente en el tiempo, a comparación con la función de segundo orden que su respuesta fue creciente en el tiempo, lo que indica que el sistema no es estable, fue por eso que se escogió aproximar el sistema a una función de primer orden, en la Figura 60 se muestra la forma de la respuesta de las dos funciones.

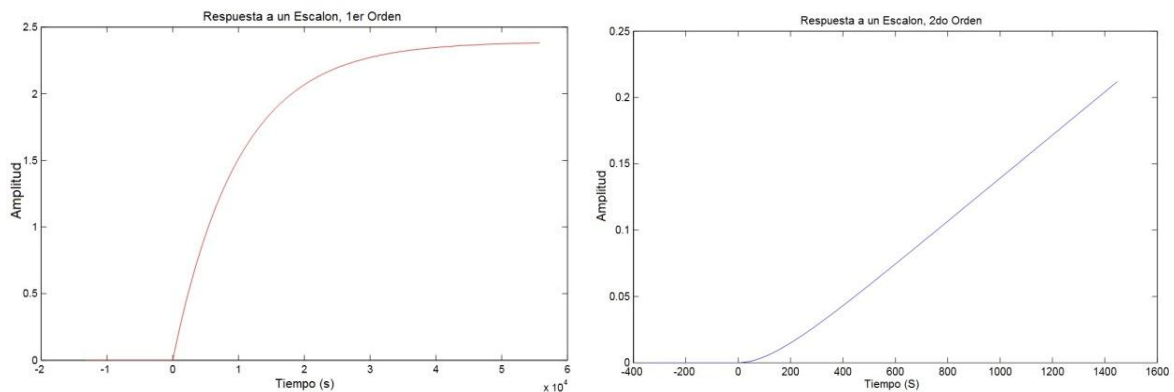


Figura 60. Respuesta a una entra escalón. a) 1er orden. b) 2do orden.

Función de transferencia del horno utilizando Ident de Matlab.

$$G(s) = \frac{2.3905}{9995.8 s + 1} \quad \text{EC 13.}$$

En la Figura 61, se observa la aproximación de la respuesta, en comparación con los datos cargados en el Ident. Con esta identificación se determino que el sistema es estable y tiene una respuesta sobre amortiguada.



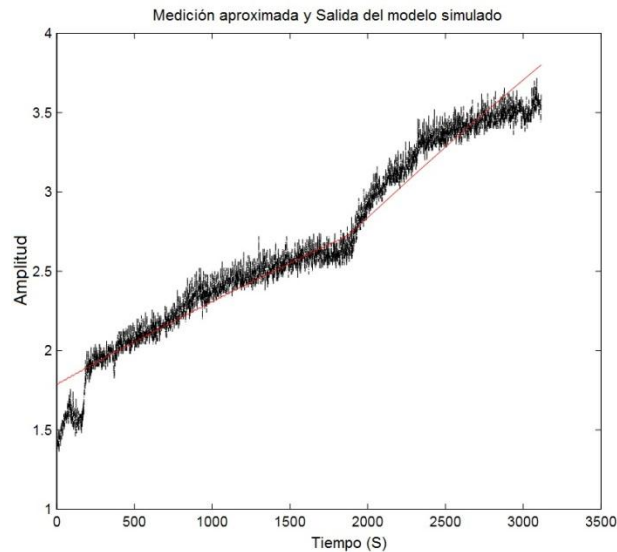


Figura 61. a) Seguimiento del modelo a los datos cargados, b) Respuesta a una entrada escalón.

Con la identificación de la cámara de temperatura se pudo determinar que era un sistema estable, pero debido al comportamiento del relé de estado sólido que es, el que actúa sobre las resistencias del horno, simplemente preendiéndolas o apagándolas, se decidió implementar un control ON/OFF con un histéresis de  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ , básicamente actúa si el sistema esta por debajo de la temperatura de referencia, se prenderán las resistencias, si llega a la temperatura deseada el control apaga las resistencias, de esta manera se controla la temperatura. En la Figura 62, se presenta el diagrama de bloques del sistema.

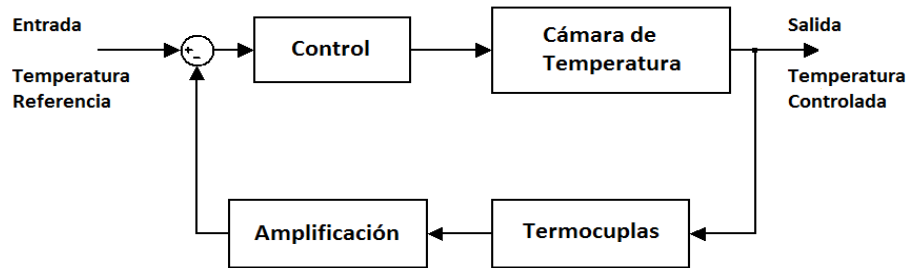


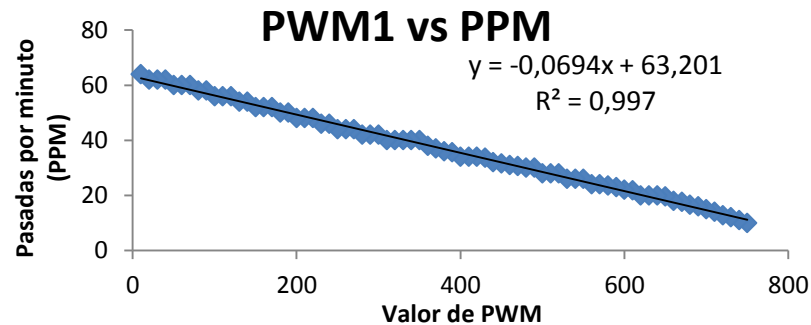
Figura 62. Diagrama de bloques, control de temperatura.

### 3.2.2 Control sistema de velocidad

Conociendo el funcionamiento del sistema, que a determinada frecuencia del motor, se obtienen una cantidad conocida de PPM, y sabiendo que ha determinado valor de ciclo útil de PWM1, se obtiene una frecuencia requerida, se procedió a tomar datos del sistema completo para cargarlos en el Ident de Matlab y obtener una función de transferencia aproximada. Luego se hizo el diseño del controlador, simulación e implementación.

Para la identificación del sistema, los datos cargados fueron de la señal de entrada al sistema que es el valor de PWM1 que hace variar el voltaje de entrada al variador de velocidad, y la señal de salida, que es el valor de las pasadas por minuto.

El rango del valor de ciclo útil está entre 10 - 800, y las PPM varían entre 66 – 4 respectivamente. En la Gráfica 12, se puede apreciar mejor la relación que hay entre la señal de PWM y las PPM.



Gráfica 12. Relación entre valor de PWM1 y las PPM del sistema de velocidad.

En la Figura 63. Se exponen las gráficas de las señales de entrada y de salida que se cargaron en el Ident. La gráfica superior muestra el comportamiento de la salida del sistema, y la gráfica inferior la señal de entrada.

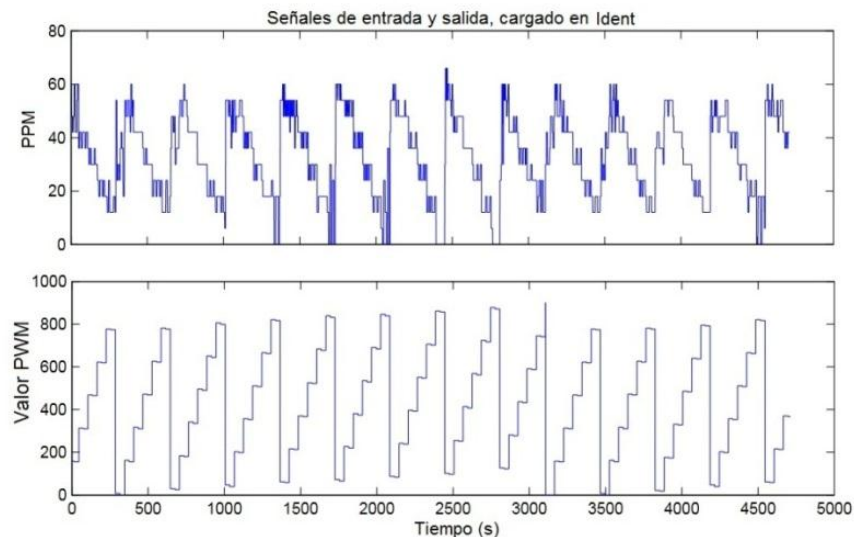


Figura 63. a) Señal de salida, PPM prensas. b) Señal de entrada, valor de PWM.

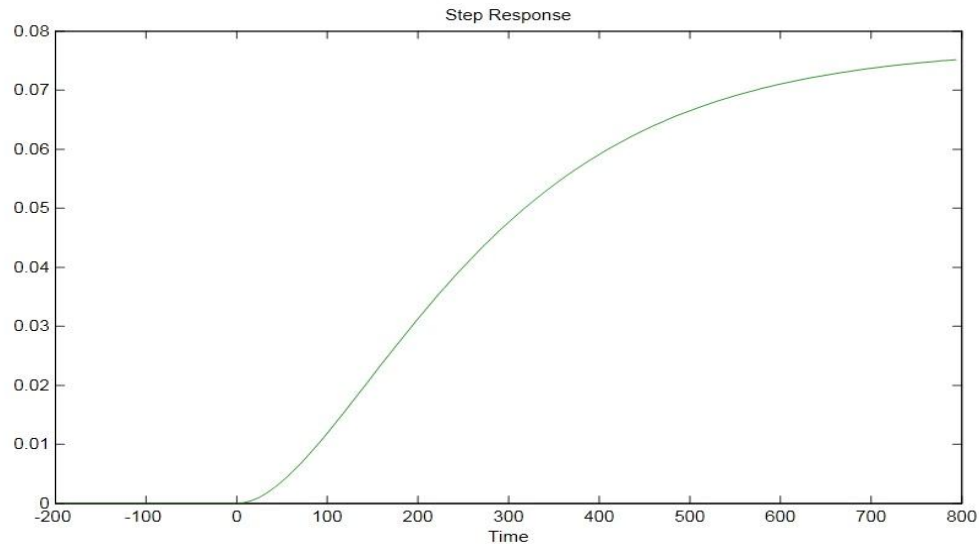
La función de transferencia fue aproximada a un sistema de segundo orden, y fue aproximada por Ident, dio como resultado:

$$G(s) = \frac{Kp}{(1+Tp1*s)(1+Tp2*s)} \quad \text{EC 14.}$$

$$G(s) = \frac{0.077182}{(143.77s+1)(143.77s+1)} \quad \text{EC 15.}$$

$$G(s) = \frac{0.077182}{20670s^2+287.54s+1} \quad \text{EC 16.}$$

Para verificar que el sistema es estable, en la Figura 64. Se puede ver la forma de la respuesta a una entrada escalón, esta Figura fue tomada de la identificación hecha en Matlab.



**Figura 64. Forma de la respuesta a una entrada escalón, tomada de la identificación.**

Para este caso se planteo implementar un controlador PI según el sistema lo permita y responda adecuadamente. Las constantes del controlador serán calculadas por el método de Ziegler-Nichols en lazo abierto o de la curva de respuesta.

Este método permite aproximar las constantes del controlador, en un sistema cuya respuesta a una entrada escalón tenga un comportamiento exponencial, para mas detalle ver la referencia.

El procedimiento de este método consiste en dejar la planta en lazo abierto, de modo que no se presente acciones de control. Se aplica una señal a la unidad de corrección y se determina la respuesta de la variable de proceso medida.

El ajuste del controlador se logra implementando los siguientes criterios, ver Tabla 13.

Controlador	Kc	Ti	Td
<b>P</b>	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
<b>PID</b>	$1.2 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.5}$	$\frac{L}{2}$

Tabla 13. Cálculo de las constantes del controlador por el método de Ziegler-Nichols.

Para calcular el valor de L y T, se utilizó un código en Matlab, que introduciendo la función de transferencia de la planta, son calculados y entregados los valores de Kc, Ti, Td, L y T, aparte de esto también gráfica la forma de la respuesta.

Introduciendo la función de transferencia del sistema y calculando las constantes para un controlador PI, se obtuvo los siguientes datos.

$$\begin{aligned}
 L &= 40.5028 \\
 T &= 389.94 \\
 Kc &= 8.6647 \\
 Ti &= 135
 \end{aligned}$$

Y la gráfica de la respuesta, con la recta tangente al punto de inflexión, ver Figura 65.

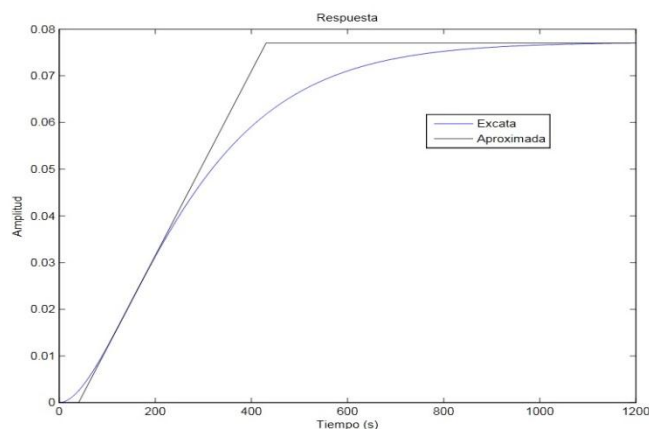
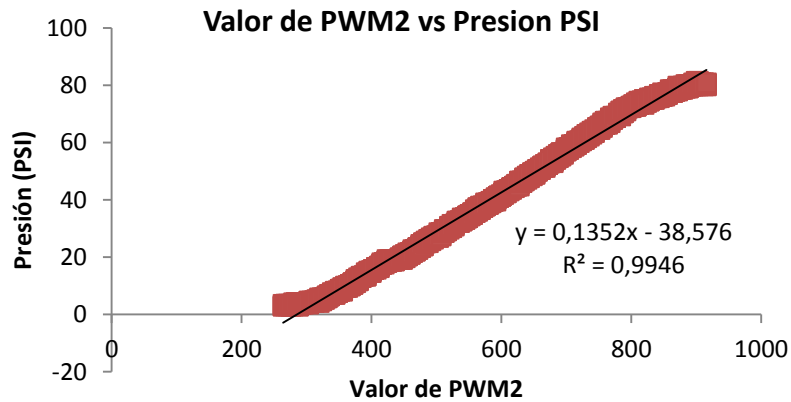


Figura 65. Gráfica de respuesta, calculando los parámetros de Ziegler-Nichols.

### 3.2.3 Control sistema neumático

Partiendo de conocer el funcionamiento del sistema, con un actuador que regula la presión con una entrada de 0 – 10VDC, que va a ser variado con una señal de PWM, y contando con un sensor de presión que mide de 0 – 100 PSI, entregando una señal proporcional de 4 – 20 mA, se procedió a tomar datos de la planta en lazo abierto, diseñar el controlador, simular e implementar el control digital.

Para la identificación del sistema, fueron tomados datos durante 60 minutos, con un periodo de muestreo de 14 datos por minuto, tanto de la señal de entrada como la de salida. Estos datos fueron cargados en el Ident de Matlab. En la siguiente Gráfica 13, se muestra la relación entre salida y entrada.



Gráfica 13. Relación entre las señales de entrada y de salida en la identificación del sistema.

Para poder hacer la conversión análogo digital en el microcontrolador se puso un resistencia de 220Ω en serie con la salida del sensor, de esta forma el valor en el que variara la salida del sensor es de 0.87 - 4.4VDC. En la Figura 66 se muestra la entrada al sistema, que es el valor de PWM que controla la válvula reguladora de presión, y la salida, que es el valor en voltaje del sensor de presión.

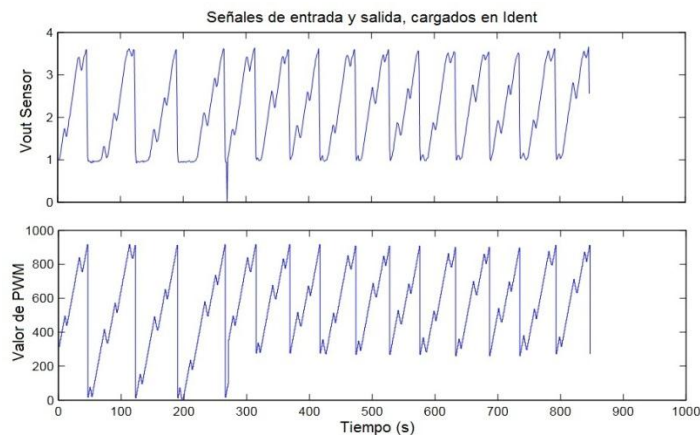


Figura 66. u1) Entrada al sistema (PWM). y1) Salida del sistema (V).

En el Ident, se aproximó a una función de primer orden y a una función de segundo orden, para ver el comportamiento de cada una, y fue escogida la aproximación a una función de primer orden debido a que el tiempo de respuesta era menor que el de segundo orden. Se obtuvo la siguiente función de transferencia.

$$G(s) = \frac{Kp}{(1+Tp1*s)} \quad \text{EC 17.}$$

$$G(s) = \frac{0.0039321}{(0.65611*s+1)} \quad \text{EC 18.}$$

En la Figura 67, se puede ver la diferencia entre la respuesta a una entrada escalón, de la función de primer orden y de la de segundo orden, el sistema de 1er orden responde más rápido.

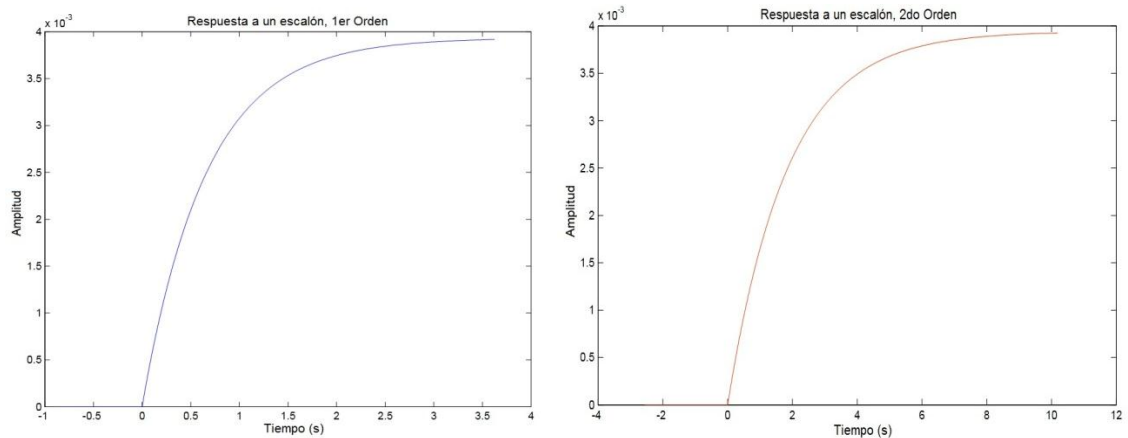
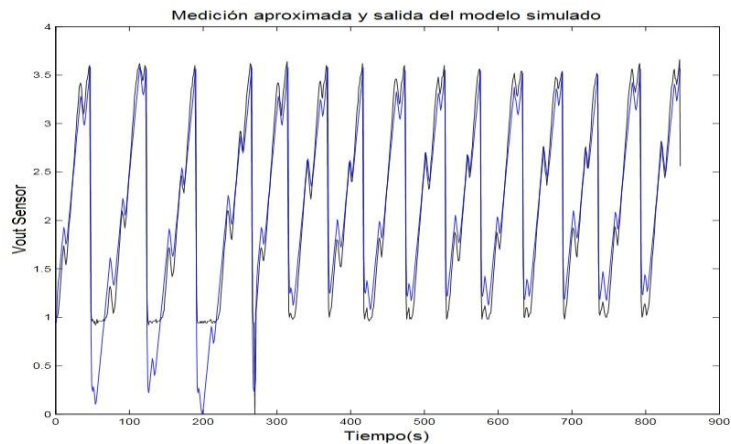


Figura 67. Respuesta a un escalón, a) 1er Orden. b) 2do Orden.

La función de transferencia de 1er orden obtenida de la identificación, sigue la respuesta real del sistema, como se puede ver en la Figura 68, señal de color negro, salida real del sistema, señal azul aproximación del Ident.



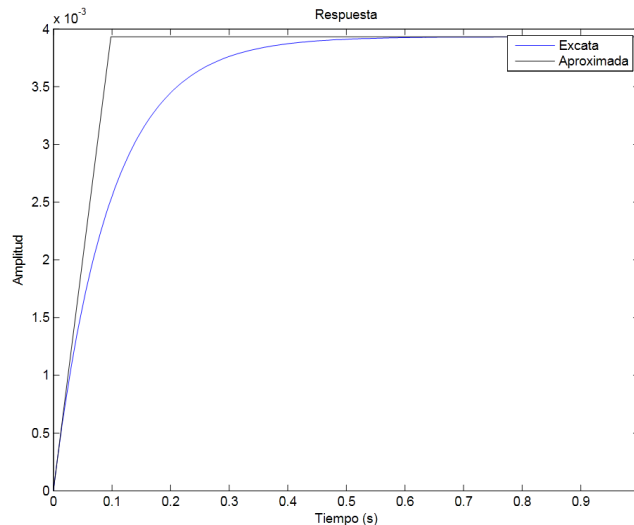
**Figura 68. Salida modelo aproximado.**

Se implemento un controlador PI, las constantes del controlador serán calculadas por el método de Ziegler-Nichols en lazo abierto o de la curva de respuesta, como se puede ver en la Figura 64 de la sección 3.2.2.

Con el criterio de cálculo de las constantes de control de la Tabla 17 de la sección 3.3.3, las constantes que se obtuvieron fueron las siguientes.

$$\begin{aligned}L &= 0.001 \\T &= 0.09 \\K_c &= 81 \\K_i &= 0.0033\end{aligned}$$

Y la gráfica de la respuesta, con la recta tangente al punto de inflexión, ver Figura 69.



**Figura 69. Gráfica de respuesta, calculando los parámetros de Ziegler-Nichols.**

### 3.2.4 Interfaz Usuario-Máquina

Es necesario para un proceso automatizado, contar con un medio en el cual el usuario de la máquina interactúe con las funciones de la misma, con este fin se diseñó una interfaz usuario máquina en LabView.

La comunicación con los circuitos de control, se hace configurando los módulos VISA de LabView, como comunicación serial, en la Figura 70, se pueden ver el módulo de configuración de la comunicación, el de escritura, lectura, y el módulo que cierra la comunicación.

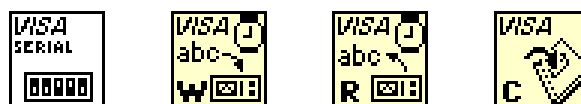


Figura 70. Módulos VISA comunicación serial RS232, tomados de LabView 2012.

Se tomo como referencia, para hacer la comunicación serial de LabView con el microcontrolador, el ejemplo Basic Serial Write and Read, que se encuentra en la base de datos de ejemplo de LabView. A continuación en la Figura 71, se muestra el diagrama de bloques de la aplicación diseñada.

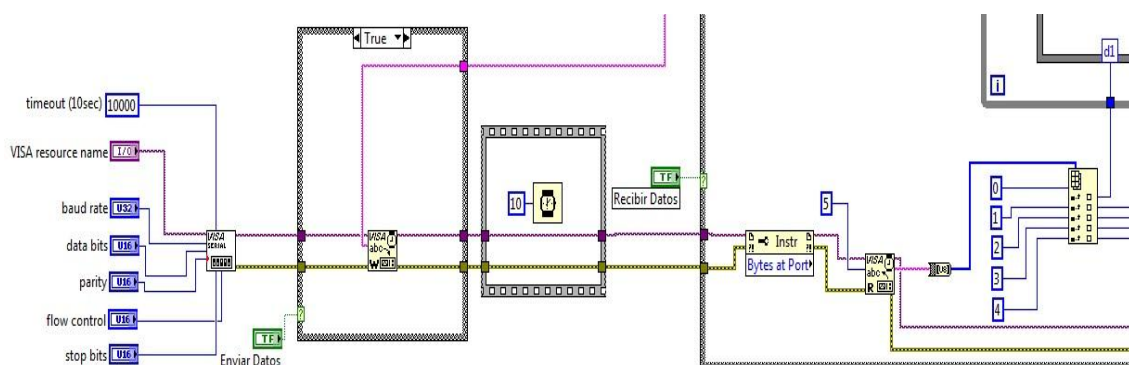


Figura 71. Diagrama de bloques comunicación serial.

Se hizo una aplicación propia para el proyecto, donde se envían y reciben datos de 8 bits, hacia y desde el microcontrolador, a una rata de 9600 baudios. Ver diagrama de bloques de la aplicación en el Anexo 19.

Desde esta aplicación el usuario monitorea las variables de control, y las señales de los sensores que miden la deformación, también desde allí antes y durante la prueba se pueden cambiar los puntos de referencia de la presión, temperatura, pasadas por minuto, y ver el comportamiento de cada uno de los sistemas, debido a que continuamente se están graficando estas señales.

Una vez se de inicio a la interfaz, se abre un cuadro de dialogo en el cual se ingresa el nombre y la ubicación del archivo de texto donde se van a guardar los datos de la prueba, estos datos se guardan en determinados momentos, durante 120 minutos. Como la norma colombiana INV E-756-07 [13], exige que se precalienten las muestras dentro de la cámara de temperatura, por un periodo de 4 horas, antes de empezar el ensayo, durante este tiempo no se guardaran datos, debido a que no estaría en funcionamiento la máquina completa, y estos datos no seria de interés para el estudio posterior.

Para el proceso de guardar los datos de la prueba se uso los módulos de I/O File de LabView, en la Figura 72 se muestran los cuatro bloques utilizados, primero el que da la



dirección y el nombre al archivo, el siguiente crea el archivo de texto, luego el encargado de guardar los datos que se necesitan y por ultimo el que cierra el archivo de texto.

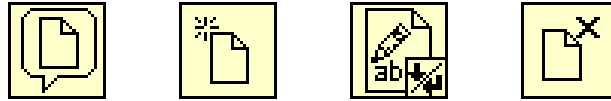


Figura 72. Módulos I/O File de LabView, usados para guardar los datos.

Se tomo como referencia para hacer la implementación de este modulo el ejemplo *Write to Text File*, que se encuentra en los ejemplos de LabView. En la Figura 73, se muestra la parte del diagrama de bloques en la que se implemento.

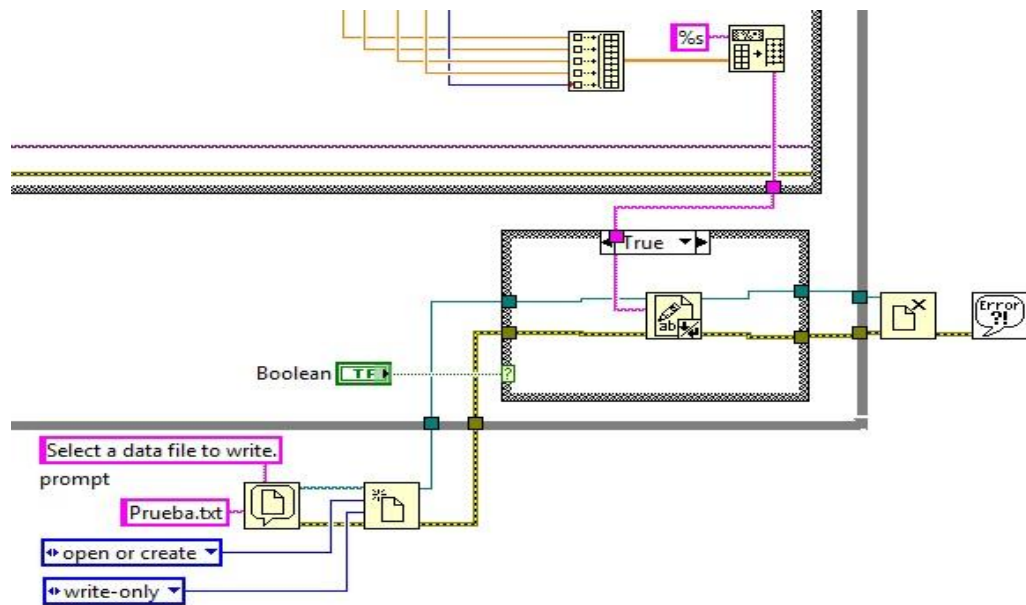


Figura 73. Diagrama de bloques, guardar datos en un archivo de texto.

A continuación en se explicaran los diferentes paneles de la interfaz.

En el panel Ensayo, es donde se grafican los datos de la deformación que esta teniendo las muestras de mezcla asfáltica, también se muestran las instrucciones principales, para llevar a cabo en ensayo. En la sección de datos se muestra la fecha la hora, las pasadas totales de las muestras de lo que va la prueba, también se muestran los minutos que va de prueba. Los botones de iniciar y parar, estos son los que dan el arranque o paro a la prueba, Ver Figura 74.

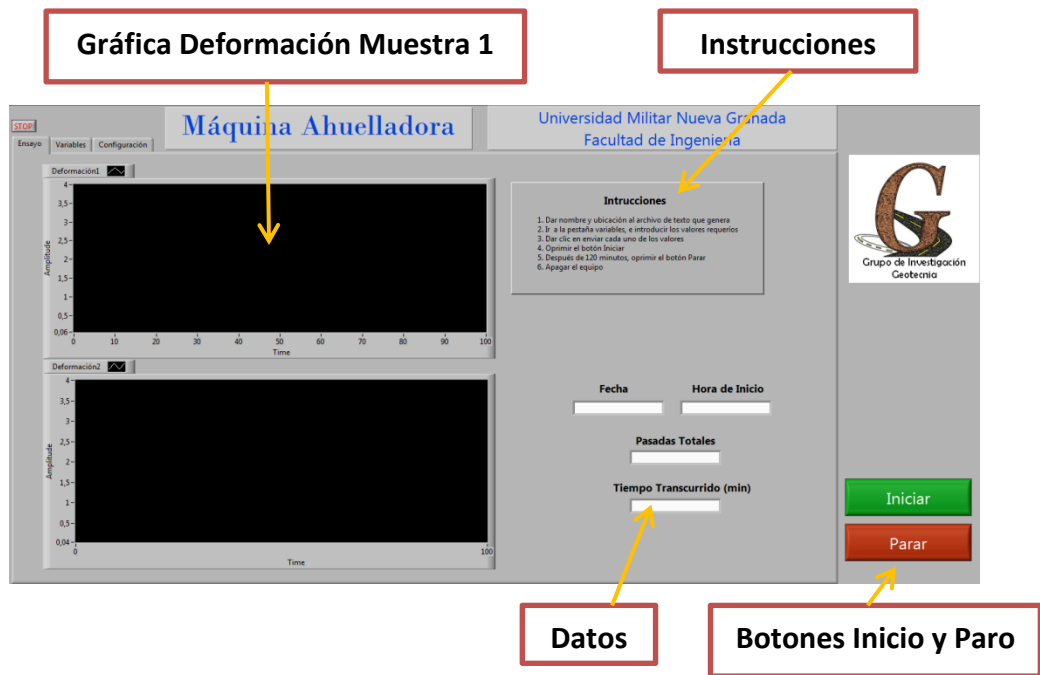


Figura 74. Panel del ensayo de ahuellamiento.

En el panel de variables, es donde el usuario cambia los puntos de referencia, al lado izquierdo de cada recuadro, en los Slide se ajustan las referencias de las variables, luego se da clic en los botones de enviar, enseguida se guardan estas referencias en el microcontrolador, y se realimentan los sistemas con, el manómetro, termómetro, e indicador de PPM. También desde acá hay la posibilidad de prender o apagar la lámpara y el ventilador, aunque el ventilador cumple la función de distribuir el calor de las resistencias, y por esto es recomendable que siempre este encendido. Ver Figura 75.

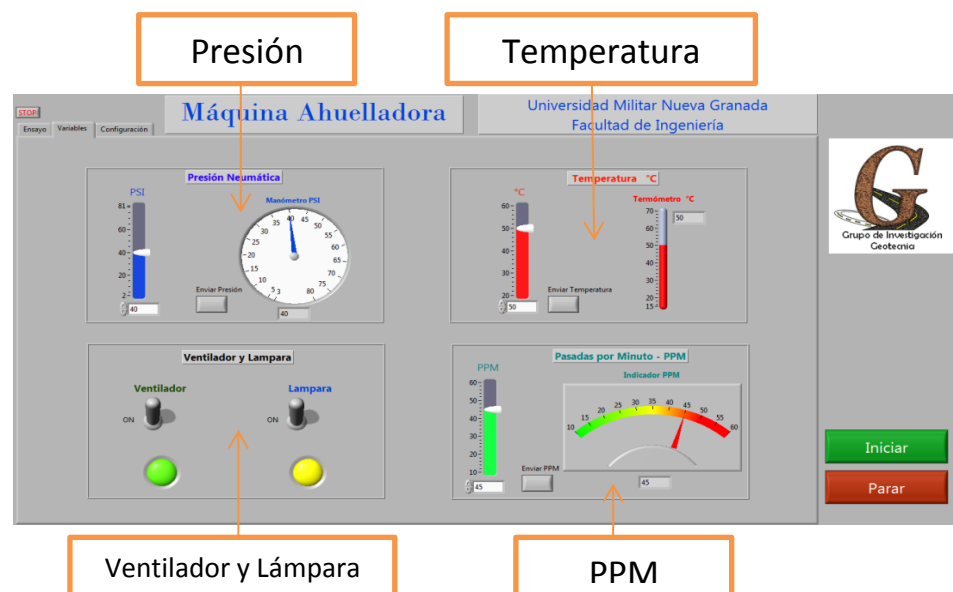


Figura 75. Panel de variables de control.

En el panel de configuración, es donde se configura principalmente el puerto COM por el que está conectado el dispositivo externo, con el que se va hacer la comunicación serial, los demás parámetros son fijos, también desde acá se puede analizar el comportamiento de las variables, temperatura, presión y PPM, que son graficadas por separado, con esto se puede ver la forma de la respuesta de cada una. Ver Figura 76.

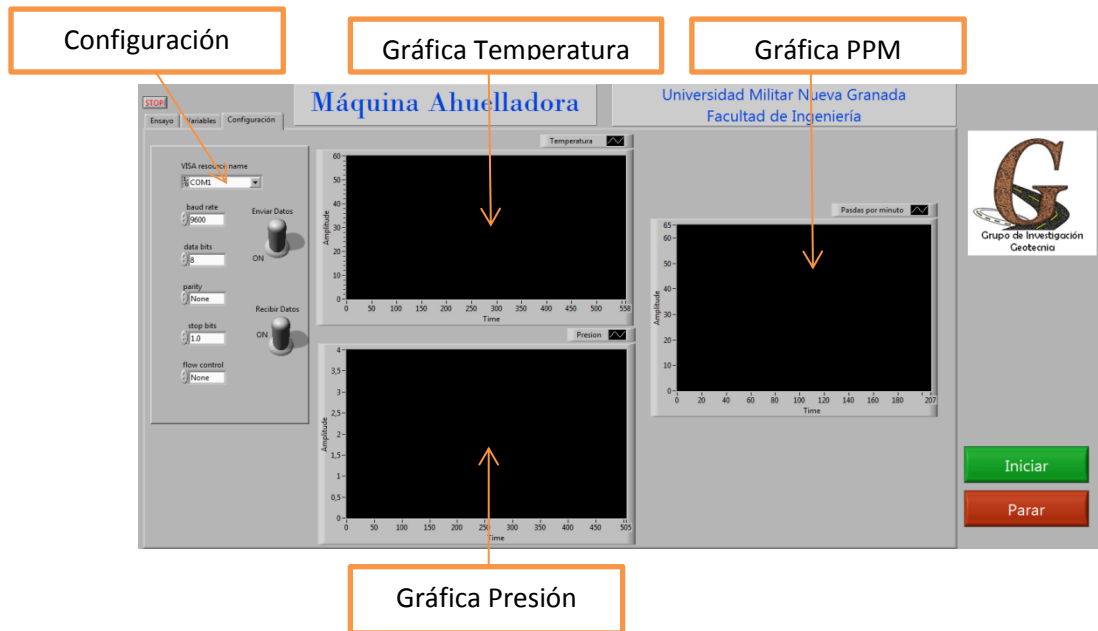


Figura 76. Panel configuración y graficas de presión, temperatura y PPM.

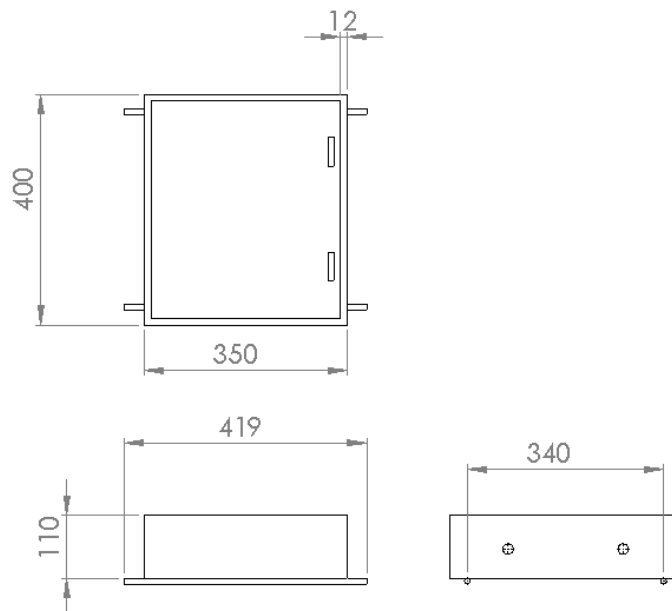
## 4 Trabajos Futuros

---

Durante el desarrollo de este proyecto, se realizaron una serie de intervenciones a la máquina ahuelladora que permitieron ponerla nuevamente en funcionamiento para que pudiese realizar el ensayo de deformación plástica en mezclas asfálticas. Además de estas intervenciones, se detectaron errores que hacían que los resultados del ensayo no fuesen precisos, estos errores fueron corregidos obteniendo como resultado mayor precisión en el ensayo. Después de haber corregido los errores con lo que contaba la máquina inicialmente se hizo nuevamente una evaluación y detección de errores, posteriormente de haber hecho este análisis, se encontró que el quipo aún tiene errores o mejoras para trabajos futuros, estas mejoras se describen a continuación.

- Teniendo en cuenta el sistema de transmisión y el conjunto de elementos que componen este sistema, se propone cambiar los rodamientos y guías de este conjunto por guías de riel con rodamientos lineales, estos además de que soportan grandes cargas, tienen la ventaja de que reducen significativamente el ruido del carro, en este caso de las prensas. Además de esto, los rieles lineales tienen la capacidad de ajustar la desalineación, causada por las inexactitudes en las distancias de separación de los rodamientos de bola que existen actualmente, además de esto, los rodamientos lineales están en la capacidad de trabajar en ambientes hostiles y a altas velocidades. Estas guías de riel con rodamientos lineales son los adecuados para poder realizar la medición de ruido al contacto entre la rueda y la muestra de asfalto, por las características anteriormente descritas, este sistema de guías es el ideal para que la máquina ahuelladora pueda realizar este tipo de ensayo.
- Se propone implementar una tarjeta de adquisición de datos *National Instrument* para poder usar el protocolo de comunicación USB; en la actualidad, la comunicación entre la máquina ahuelladora y el computador se realiza por medio del protocolo RS232, al tener la comunicación por USB con la tarjeta de adquisición NI, aumenta la velocidad de transmisión aumentando así el periodo de muestreo, esto permite que se pueda tomar la mayor cantidad de muestras en un segundo. Además de esto, el software de desarrollo *LabView* cuenta con una serie de herramientas que ayudan al procesamiento de señales análogas; el circuito de acondicionamiento con el que cuenta la máquina ahuelladora, implementa los integrados de instrumentación AD626 y LM324, estos integrados permiten hacer amplificación de señales del orden de mV, la desventaja de estos amplificadores de instrumentación, es que los valores de las resistencia, condensadores etc, calculados no son fabricados comercialmente, variando así el valor de la ganancia calculada, este circuito de acondicionamiento también tiene una cantidad de filtros pasa-bajos predeterminada en el diseño del circuito electrónico. Al poder implementar los módulos que tiene integrado la tarjeta y el software de NI, se puede hacer un tratamiento mejor a las señales que entregan los sensores, se podrá dar ganancias deseadas, se podrá filtrar la señal como se desee, ya sea utilizando filtros pasa-bajos, pasa-altos o pasa-banda y utilizar la cantidad de filtros que se necesiten y hacer el procesamiento directamente en el computador y no en el micro controlador como sucede actualmente.

- Para efectos de monitoreo y supervisión remota del ensayo para medir la deformación plástica en mezclas asfálticas, se plantea la implementación de una cámara infrarroja IP, esta cámara debe estar en capacidad de soportar altas temperaturas debido a que va a estar ubicada al interior del horno en donde se desarrollan los ensayos, también se propone que sea infrarroja debido a que el interior de la máquina tiene escasa visibilidad. En la actualidad, durante el desarrollo del ensayo, el personal capacitado para usar el equipo debe estar presente supervisando el ensayo, ya que la máquina cuenta con un sistema automatizado, se propone que el ensayo se pueda realizar remotamente.
- Con el fin de hacer que la máquina pueda realizar el ensayo siguiendo diferentes normas, se propone la implementación de una tercera prensa con dimensiones de 40cm de largo por 35 cm de ancho por 11 cm de profundidad y la platina de calibre de 12mm, la distancia entre ejes debe ser de 34cm y la longitud del eje debe tener 41.9 cm, estas dimensiones se pueden ver en la Figura 77.



**Figura 77. Dimensiones de la tercera prensa.**

Estas modificaciones se realizan para poder realizar el ensayo como lo exigen normas diferentes a la colombiana, esta tercera prensa debe ser desmontable, y va a estar ubicada en el medio acoplándose al sistema de transmisión con el que cuenta la máquina. En la Figura 78 y 79 se muestra el modelo en CAD de la implementación.

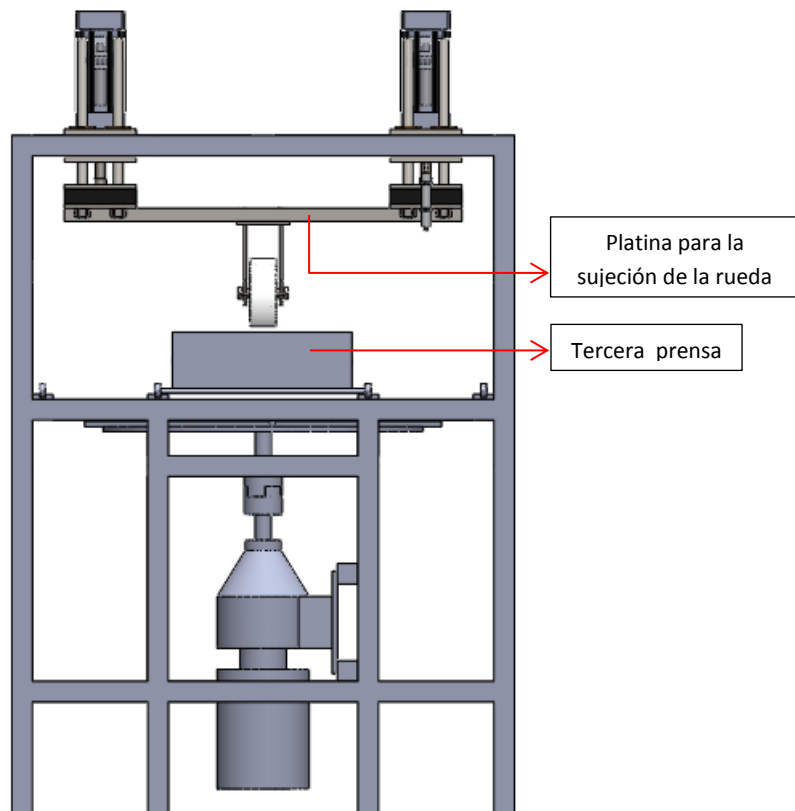


Figura 78. Modelo en CAD de la implementación de la tercera prensa, Vista Frontal.

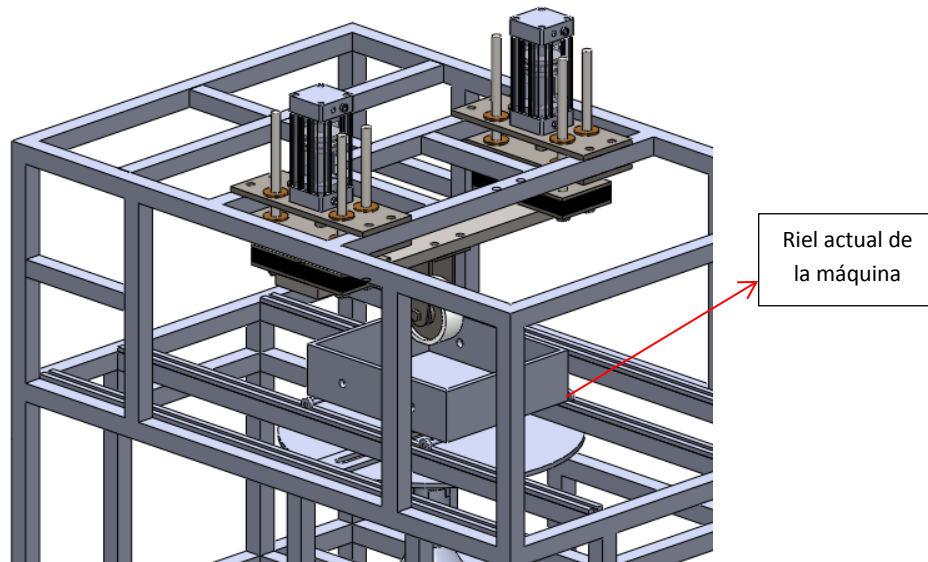
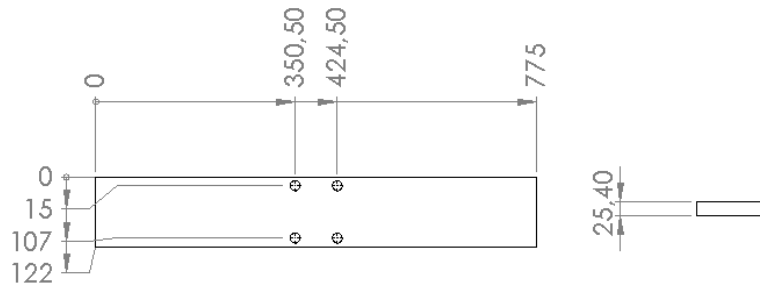
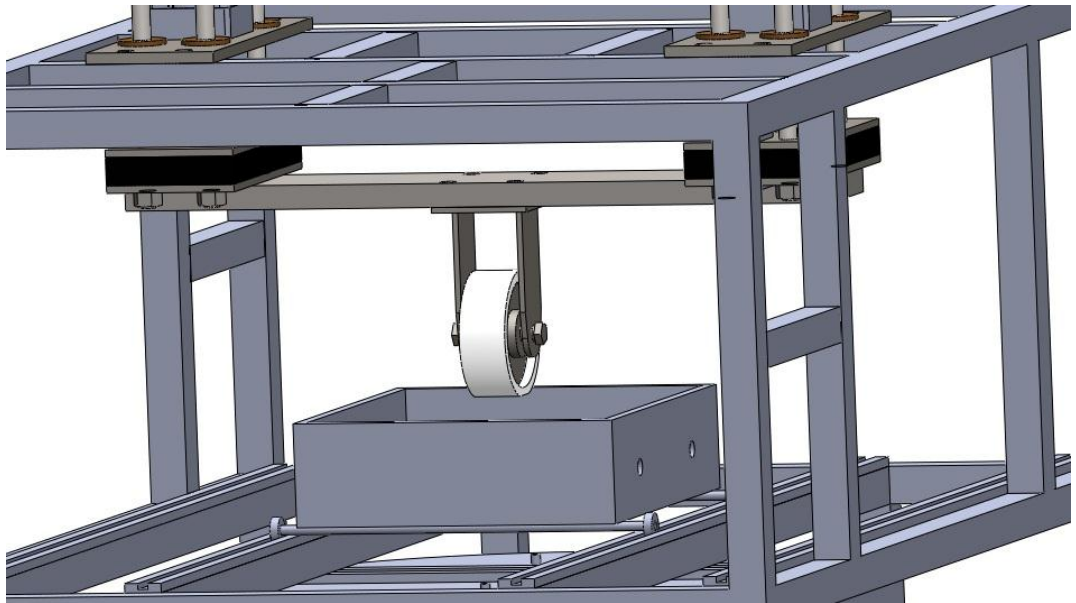


Figura 79. Modelo en CAD de la implementación. Nótese que esta va acoplada al sistema de transmisión actual y la platina para ejercer presión también esta acoplada al sistema de sujeción que tiene la máquina.

Como se observa en la Figura 79, la tercera prensa estaría acoplada al actual sistema de transmisión de movimiento, y para poder ejercer presión sobre la muestra que va en esta prensa, se propone una platina que une los vástagos de los dos cilindros, sabiendo que estos ejercen la misma presión se puede usar para el desarrollo del ensayo, en la Figura 80 se muestra las dimensiones de esta platina y en la Figura 81 se muestra como esta platina se acopla al sistema actual que tienen los cilindros neumáticos.



**Figura 80. Dimensiones de la platina que une los vástagos de los cilindros neumáticos.**



**Figura 81. Implementación de la platina que une a los vástagos. Nótese que la platina se sujeta al sistema actual que tienen los cilindros para aplicar la fuerza.**

- Durante el desarrollo del proyecto, se encontró que el juego de empaque de los actuadores esta desgastado, se propone cambiar la empaquetadura, además se encontró que uno de los actuadores tiene una fuga al estar retraído, esta fuga no afecta el ensayo pero si se recomienda cambiar la pieza que esta averiada. Reparar estas piezas del sistema neumático sirven como mantenimiento para mantener el buen funcionamiento de los actuadores.

# Conclusiones

---

- La máquina ahuelladora que se encuentra en el laboratorio de pavimentos, del programa de Ingeniería Civil, fue puesta en funcionamiento y se logro llegar hasta el 2do nivel de la pirámide de la automatización, el cual comprende, instalación de la sensorica, mecanismos, los elementos de media y baja tensión, dispositivos de control y su correspondiente software, permitiendo que en trabajos futuros se continúe con la implementación total sugerida en la pirámide de la automatización.
- Se redujeron los esfuerzos hasta un 40% con los refuerzos implementados tanto en la estructura como en los vástagos, garantizando así un aumento en el tiempo de vida útil a cada uno de los elementos hasta en un 50%. Esto permite que durante el desarrollo del ensayo se garantice la finalización del mismo y que no se interrumpa el ensayo.
- Se diseño e implemento un sistema electrónico que permite dar órdenes de acción según la señal de los sensores recibida. Es así como los actuadores y sensores se integraron en un sistema centralizado desde un computador, el cual está comunicado por protocolo RS232 con la etapa de control implementada en un microcontrolador. El microcontrolador demostró que está en la capacidad de hacer las veces de tarjeta de adquisición de datos cumpliendo con la mayor parte de exigencias que se tienen en la aplicación en este proyecto.
- Se logro controlar las variables más importantes que intervienen en el ensayo de ahuellamiento en mezclas asfálticas, como la temperatura, la presión de ahuellamiento y la velocidad con la que se mueven las probetas, lo que garantiza tener condiciones controladas del ensayo. Esto permite que los resultados que arroja la máquina ahuelladora al finalizar el ensayo, sean confiables y coherentes con lo que establece las normas que rigen este tipo de ensayos, haciendo de este un equipo confiable.
- La interfaz usuario máquina que se diseño, permite que el operario de la prueba monitoree cada variable mediante graficas y elementos como manómetros, termómetros y velocímetros, desde allí se tiene mando sobre los diferentes elementos que componen el equipo además de tener la capacidad para que los datos del ensayo sean guardados en un archivo de texto. Con esto datos se puede saber bajo que condiciones se realizó el ensayo y como fue el comportamiento de este a través del tiempo, además la utilización de manómetros como elementos de visualización permiten que el usuario tenga presente la magnitud normal de comportamiento sin necesidad de tener un valor numérico fijo como referencia, esto en caso que exista una situación anormal pueda hacer las correcciones respectivas.



- Se detectaron las fuentes de error con las que la máquina ahuelladora continua, después de haberla puesto en funcionamiento y automatizarla, la mayor parte de los errores encontrados fueron solucionados, pero debido a que la máquina no se encuentra en su etapa final, ésta aun cuenta con algunos errores, las soluciones a estos, se plantearon como trabajos a futuro. Esto permite tener conocimiento de cuales son las etapas posteriores de este proyecto y se debe hacer en cada etapa que se proponga para su mejoramiento.
- Los conocimientos adquiridos durante nuestra formación académica fueron fundamentales en el desarrollo de este proyecto, ya que se aplicaron términos de materias básicas como física mecánica, electrónica entre otras, pasando por diseño mecatrónico, sensores hasta llegar a aplicar términos de materias avanzadas como control y automatización, conocimientos que permitieron llevar a cabo y con satisfacción la culminación del presente proyecto. Esto demuestra que el perfil del ingeniero en Mecatrónica de la Universidad Militar Nueva Granada está en la capacidad de enfrentar cualquier reto que la industria moderna le ponga teniendo resultados satisfactorios y poniendo en un lugar alto a la universidad.

# Bibliografía

---

- [1] O. Reyes, J. Camacho y T. Juan., MÁQUINA DE AHUELLAMIENTO PARA EL CÁLCULO DE DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS, Bogotá DC: Universidad Militar Nueva Granada, 2005, p. 2005.
- [2] Jorge A. Álvarez Pabón Ingeniero de Proyectos – ICPC, ESTABILIZACION DE SUBRASANTES. <http://es.scribd.com/doc/22379899/SUBRASANTE>. 2007
- [3] Alejandro Padilla Rodríguez, CAPÍTULO 3. MEZCLAS ASFÁLTICAS, UPC, <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/14/34065-14.pdf>
- [4] Oficina técnica ingeniero José Heredia & asociados C.A. Guía de Fallas de Pavimento Rígido y Flexible Soluciones, Clasificación de las fallas de pavimentos flexibles y rígidos, Tomados de experiencias en los proyectos de rehabilitación para el instituto de vialidad del estado Carabobo en I004 y t001. 2006
- [5] Schevenin Pinedo, B A, Aditivo Para Asfalto Que Evita El Desprendimiento Entre Otras Fallas En El Pavimento Asfaltico, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 1998.
- [6] Robert Y. Liang, Mechanistic evaluation of the georgia loaded wheel tester for superpave asphalt mixtures, Akron, Ohio, The University of Akron, 2004.
- [7]. Ronald Collins, Haroon Shami, James S. Lai, Use of Georgia Loaded Wheel Tester to Evaluate Rutting of Asphalt Samples Prepared by Superpave Gyratory Compactor, Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2007.
- [8] Marcelo Andrés Moreno Chávez, Efecto De La Presencia De Humedad En El Comportamiento De Mezclas Asfálticas Sometidas A Ensayo De Rueda De Carga (Norma Nlt-173/84), Santiago De Chile, Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento De Ingeniería Civil, Universidad De Chile, 2011.
- [9]. UPC, aparatos para ensayo de materiales - instrumentación científica.
- [10] Kandhal, P.S. and Cooley, L.A. (2003). NCHRP Report 508: Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C. [http://trb.org/news/blurb\\_detail.asp?id=2169](http://trb.org/news/blurb_detail.asp?id=2169). Accessed December 2004.
- [11]. Pavementtechnology, Asphalt Pavement Analyzer.
- [12] Izzo, R P, Use of the Hamburg Wheel Tracking Device for Evaluating Moisture Susceptibility of Hot-Mix Asphalt, This paper appears in Transportation Research Record No. 1681, Hot-Mix Asphalt Mixtures. Transportation Research Board 500 Fifth Street, NW Washington, DC 20001 USA, 1999.

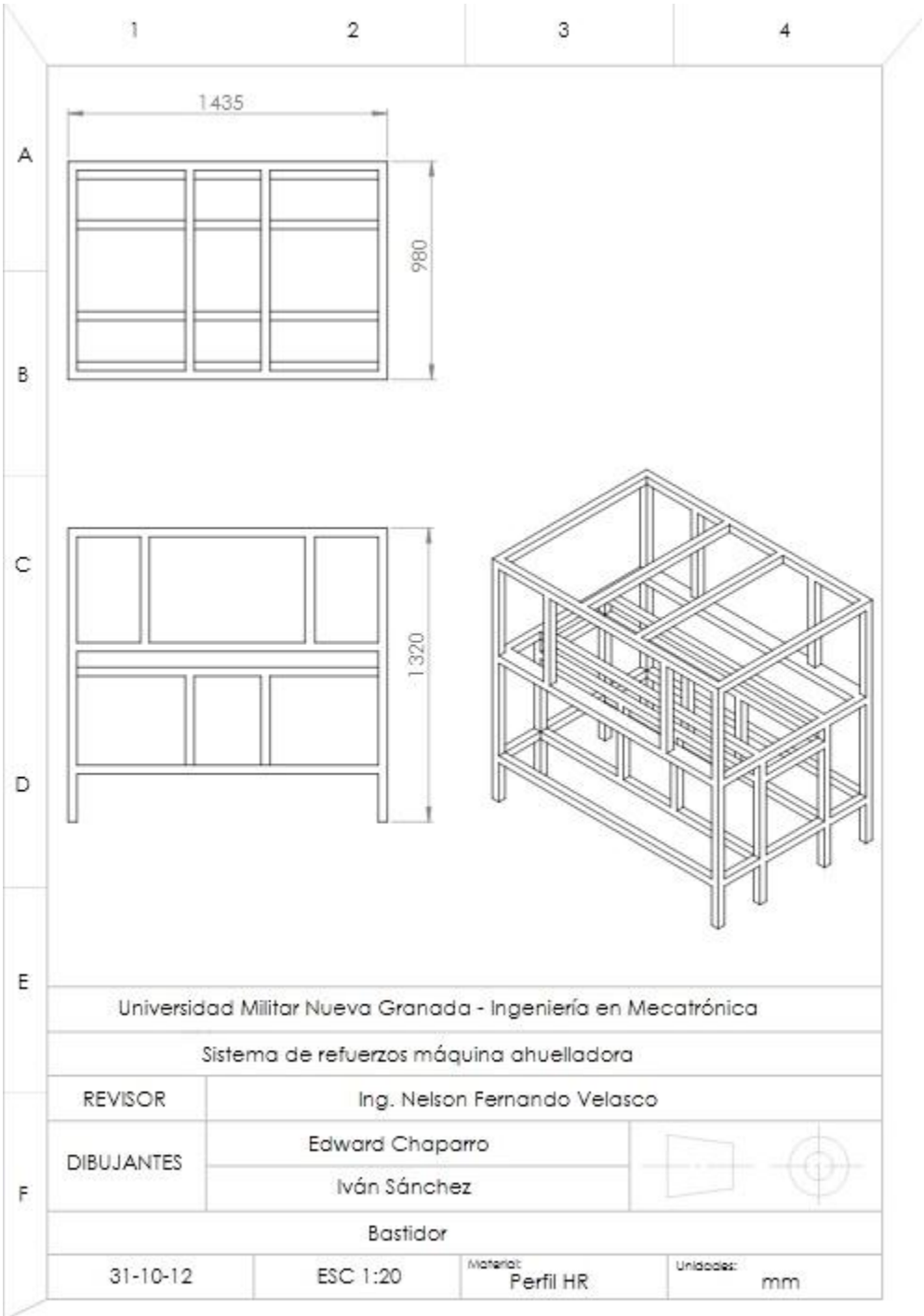
- [13] Yetkin Yildirim and Kenneth H. Stokoe II, Analysis of Hamburg Wheel Tracking Device Results, UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN, February 2006.
- [14] Vivar, E. d., and J. E. Haddock. HMA Pavement Performance and Durability. Publication FHWA/IN/JTRP-2005/14. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2006. doi: 10.5703/1288284313391.
- [15] Marcelo Andrés Moreno Chávez. Efecto de la presencia de humedad en el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a ensayo de rueda de carga (norma nlt-173/84). Memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago de Chile. Universidad de Chile, facultad de ciencias físicas y matemáticas, departamento de ingeniería civil. 2011.
- [16] R. Christopher Williams<sup>1</sup>, Brian D. Prowell<sup>2</sup>, Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results with Wes Track Performance, FHWA, Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike, McLean, VA 221012 Virginia Transportation Research Council, 530 Edgemont Road, Charlottesville, VA 22903, 2007.
- [17] Jusang Lee<sup>1</sup>, Y. Richard Kim<sup>1</sup>, Emily O. McGraw<sup>2</sup>, Performance Evaluation of Bituminous Surface Treatment Using Third-Scale Model Mobile Loading Simulator, <sup>1</sup>Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, North Carolina State University, Mann Hall, Stinson Drive, Raleigh, NC 27695-7533 <sup>2</sup>North Carolina Department of Transportation, , State Road Maintenance Unit, 4809 Beryl Road, Raleigh, NC 27606, 2007
- [18] Sugjoon Lee. Long-Term Performance Assessment Of Asphalt Concrete Pavements Using The Third Scale Model Mobile Loading Simulator And Fiber Reinforced Asphalt Concrete. Trabajo de grado Ph.D. Carolina del Norte USA. Departments Of Civil Engineering And Fiber And Polymer Science. 2003.
- [19] Instituto de desarrollo Urbano (IDU) e Instituto Nacional de Vías (INVIAS), Resistencia A La Deformación Plástica De Las Mezclas Asfálticas Mediante La Pista De Ensayo De Laboratorio, I.N.V. E – 756 – 07.Bogotá, 2002
- [20] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 3, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure Düsseldorf, 1993, 190 s., ISBN 3-18-400840-1
- [21] M<sup>a</sup> Rosa Elosúa<sup>1</sup>, Francisco Gutiérrez<sup>1</sup>, Juan Antonio García Madruga<sup>2</sup>, Juan Luis Luque<sup>2</sup> y Milagros Gárate<sup>3</sup>, software, instrumentación y metodología, <sup>1</sup> UNED (Madrid), <sup>2</sup> Universidad de Málaga y <sup>3</sup> Universidad de Cantabria, 1996.
- [22] Javier Marchesi<sup>1</sup>, Ezequiel Ducculi<sup>1</sup>, Jorge Adaro<sup>1</sup>, Amílcar Fasulo<sup>1</sup> y <sup>2</sup>, <sup>1</sup> SISTEMATIZACION DE LAS MEDICIONES DE PRODUCCION Y TEMPERATURAS DE DESTILADORES SOLARES EN LA U.N.R.C, Universidad Nacional de Río Cuarto, Universidad Nacional de San Luis, Chacabuco y Pedernar, 2007

- [23] Marc Vila Mani, Roger Juanpere Tolrà, Alineación inicial de un motor PMSM con encoder incremental mediante sensores de efecto Hall, Ingenia-CAT S.L. – Motion control department, Barcelona, España, 2008.
- [24] Marcelo Andrés Moreno Chávez. Efecto de la presencia de humedad en el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a ensayo de rueda de carga (norma nlt-173/84). Memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago de Chile. Universidad de Chile, facultad de ciencias físicas y matemáticas, departamento de ingeniería civil. 2011.
- [25] RAMÓN PALLAS ARENY. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona, Marcombo. 1998.
- [26] R. Ernesto Rubio, S. Luis Hernández, S. Rafael Aracil, P. Roque Saltarén, Q. Raúl Moreno, Modelado, Identificación y Control de Actuadores Lineales Electroneumáticos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Volume 4, Issue 4, Pages 58-69.
- [27] Capitán Vallvey, Luis Fermín Valencia Mirón, Carmen Gutiérrez del Moral, Gregorio Método de control electromecánico de válvulas rotatorias para la inserción o mezcla de fluidos, Universidad de Granada, Madrid, 1998.
- [28] Leonardo Mosquera Antury, Automatización de un equipo de pruebas de relación vapor-líquido en combustibles para petrocomercial, Proyecto Previo A La Obtención Del Título De Ingeniero En Electrónica Y Control, Escuela Politécnica Nacional, 2009
- [29] Monica Priscilla Guerrero Echeverria, Diseño Y Construcción De Un Dispositivo Monofasico Para Alimentar Un Motor Trifasico De Inducción, Ecuador. 2007
- [30] Edmundo Nava Honc, Mario Reyes Ayala, Edgar Andrade González, Sistema Analizador De Figuras Poligonales Por Visión Artificial (Visar), UAM-AZC, Departamento de Electrónica, Área de Comunicaciones, Mexico, 2007.
- [31] Y. E. CORPORATION, *J7 Driver Technical Manual*, 2003.
- [32] N. S. Corporation, «TI,» August 2004. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/dssymmlink/lm124-n.pdf>.
- [33] I. Analog Devices, «Analog,» 2003. [En línea]. Available: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD626.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD626.pdf).

# Anexos

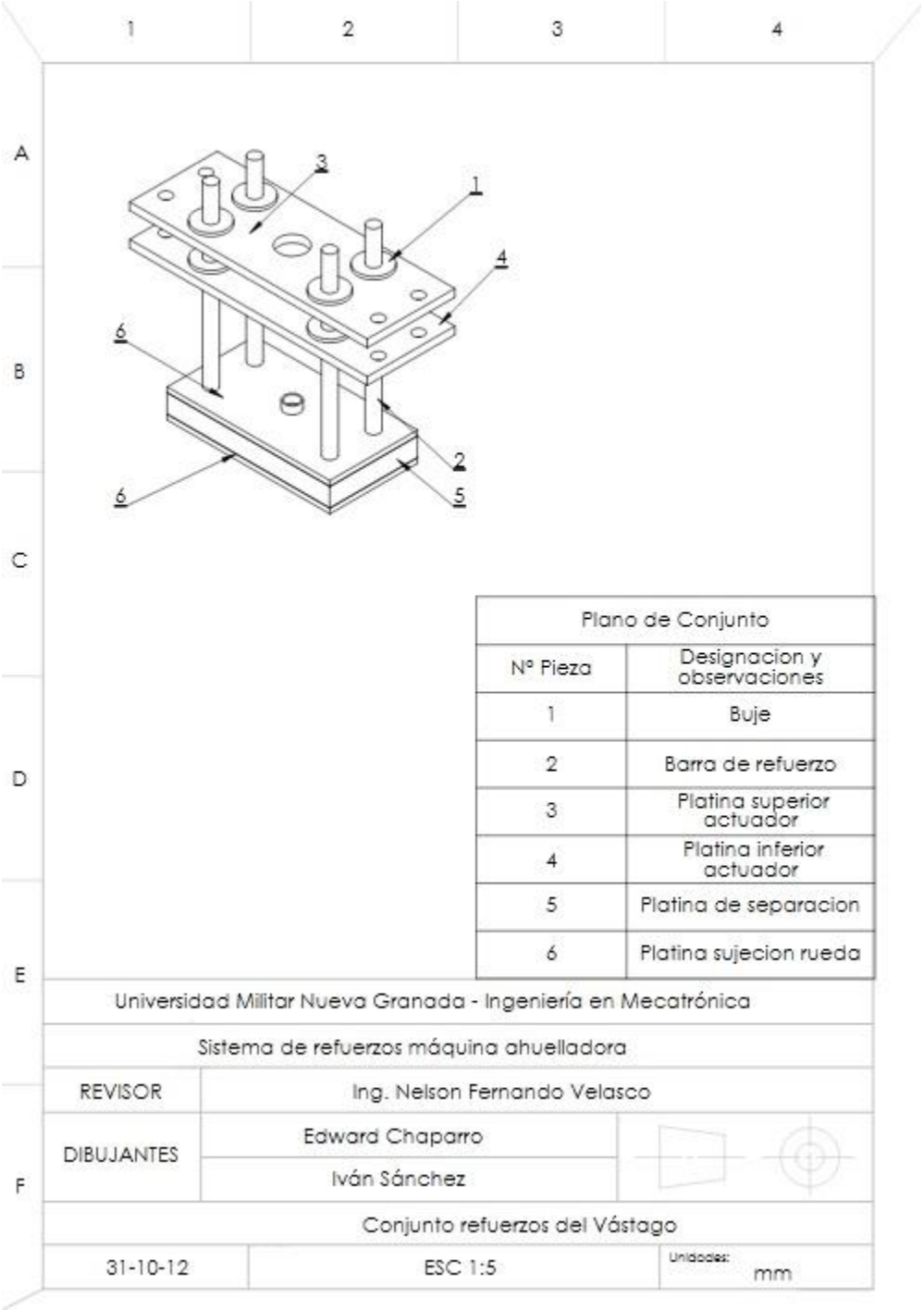
## ANEXO 1

Dimensiones del bastidor



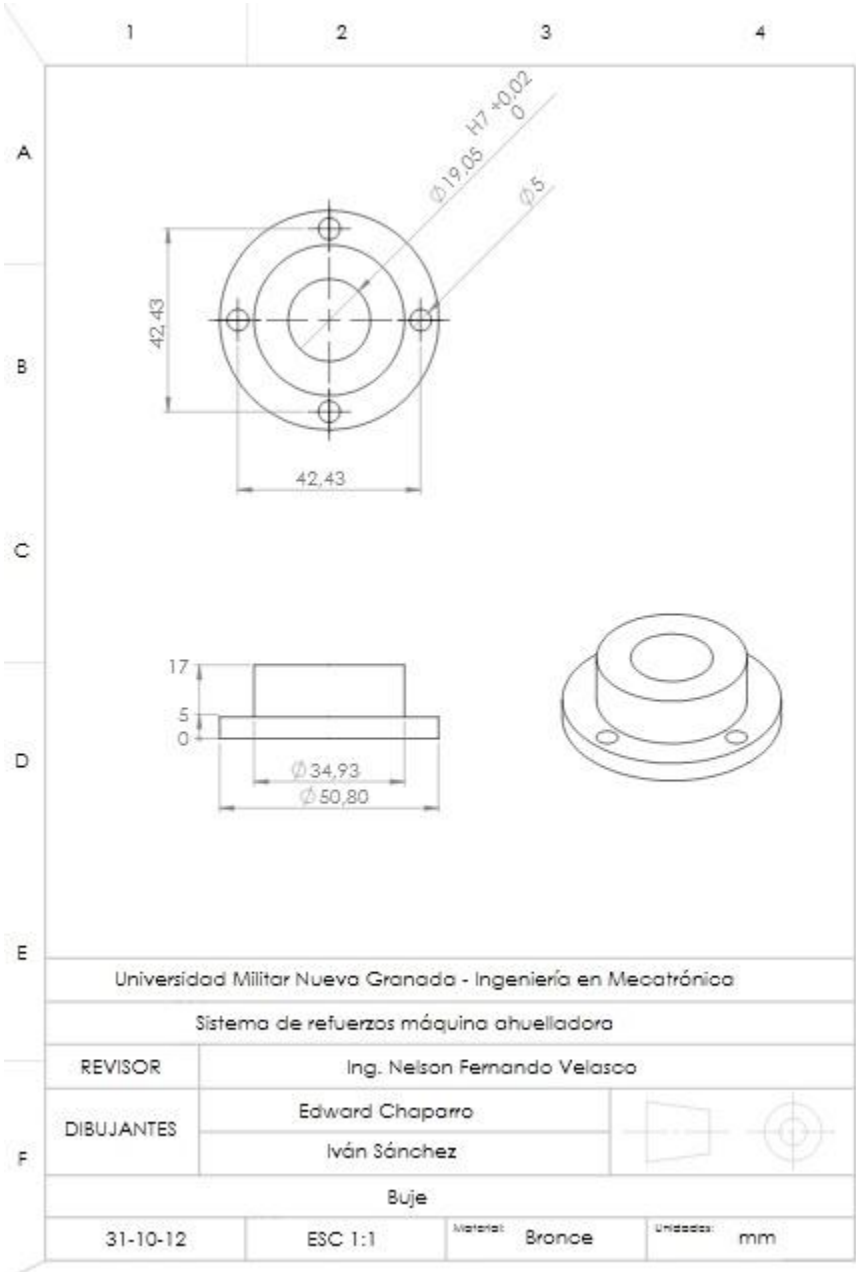
ANEXO 2

Planos del sistema de refuerzos



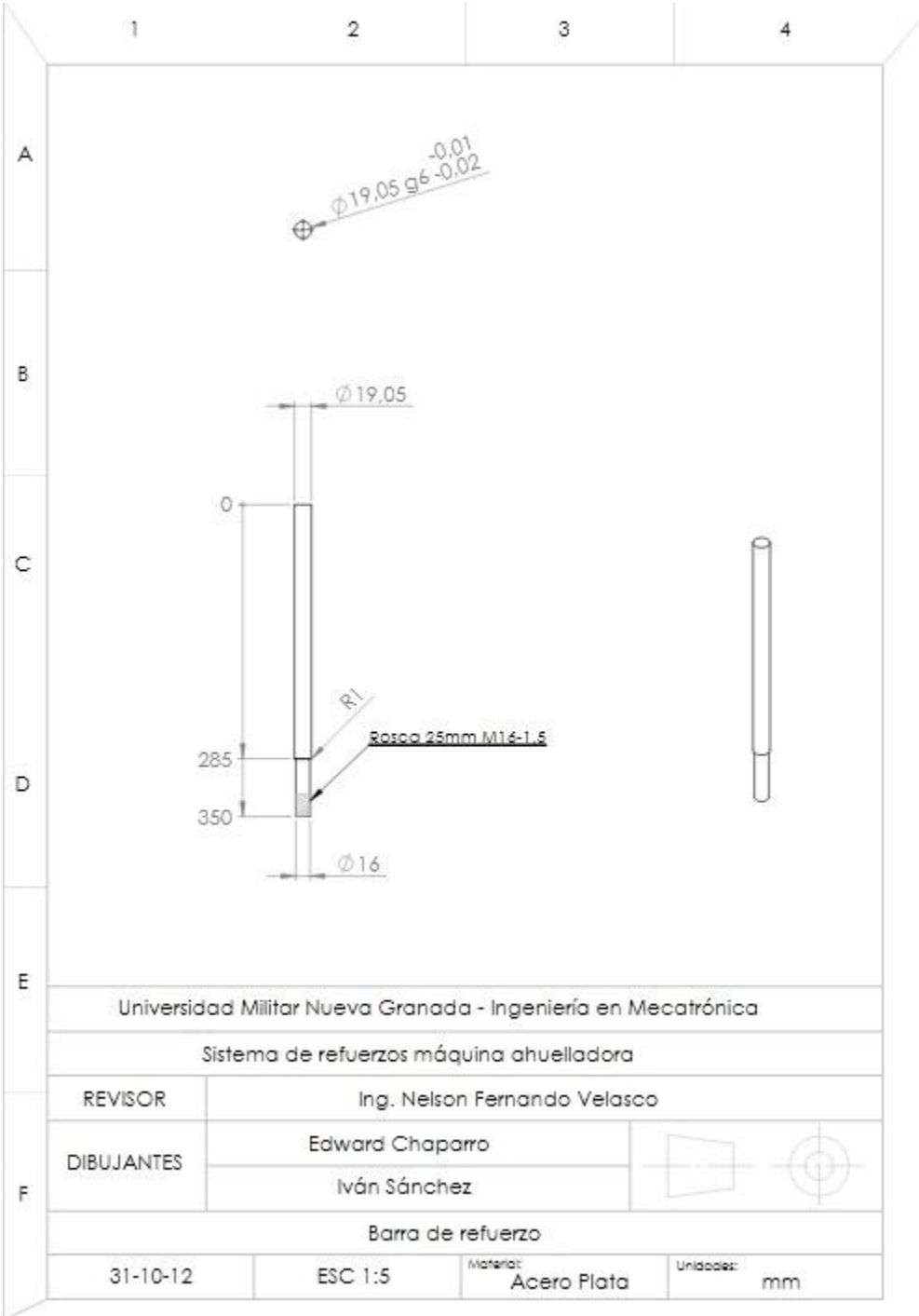
ANEXO 3

Buje



# ANEXO 4

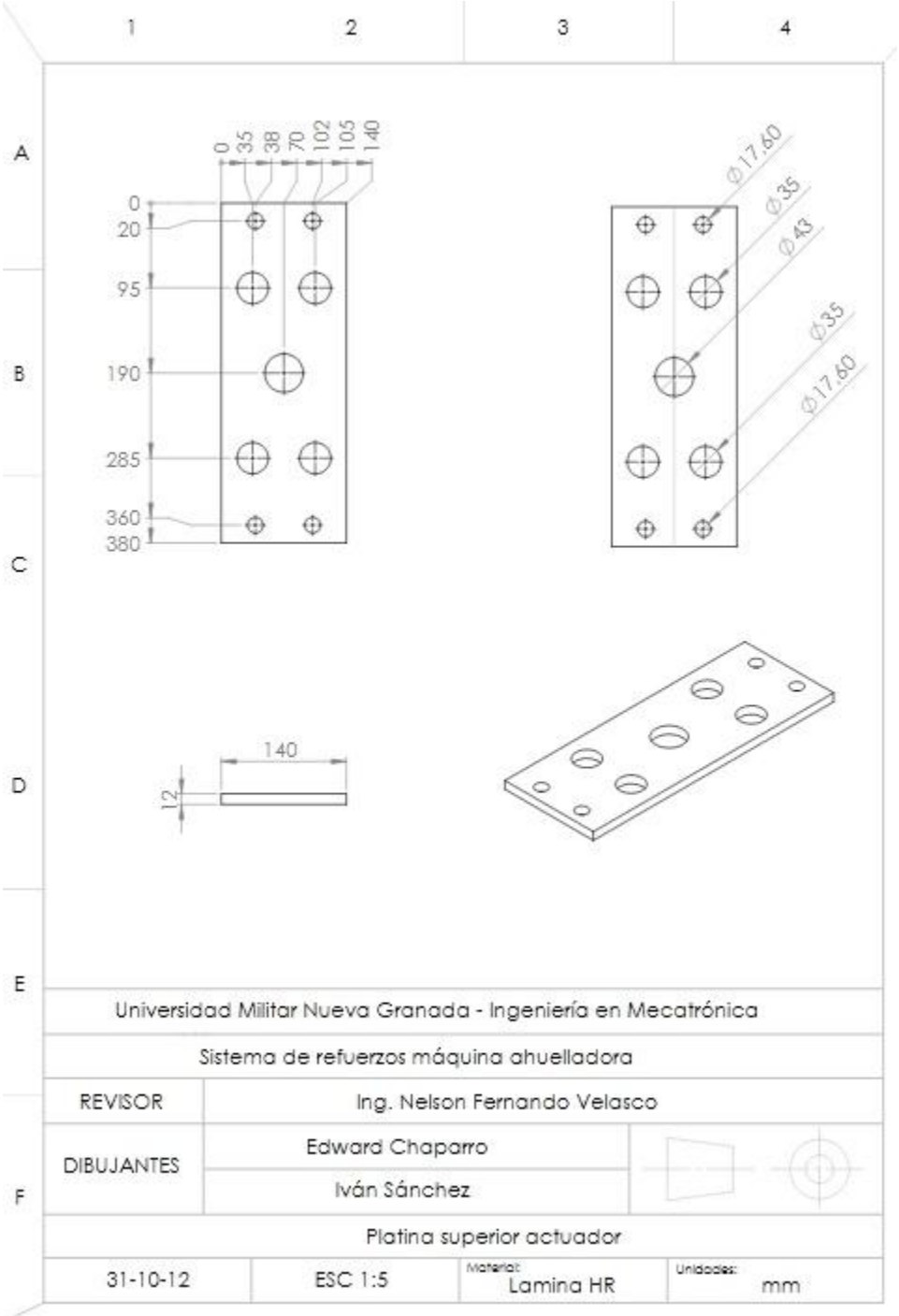
Barra de refuerzo





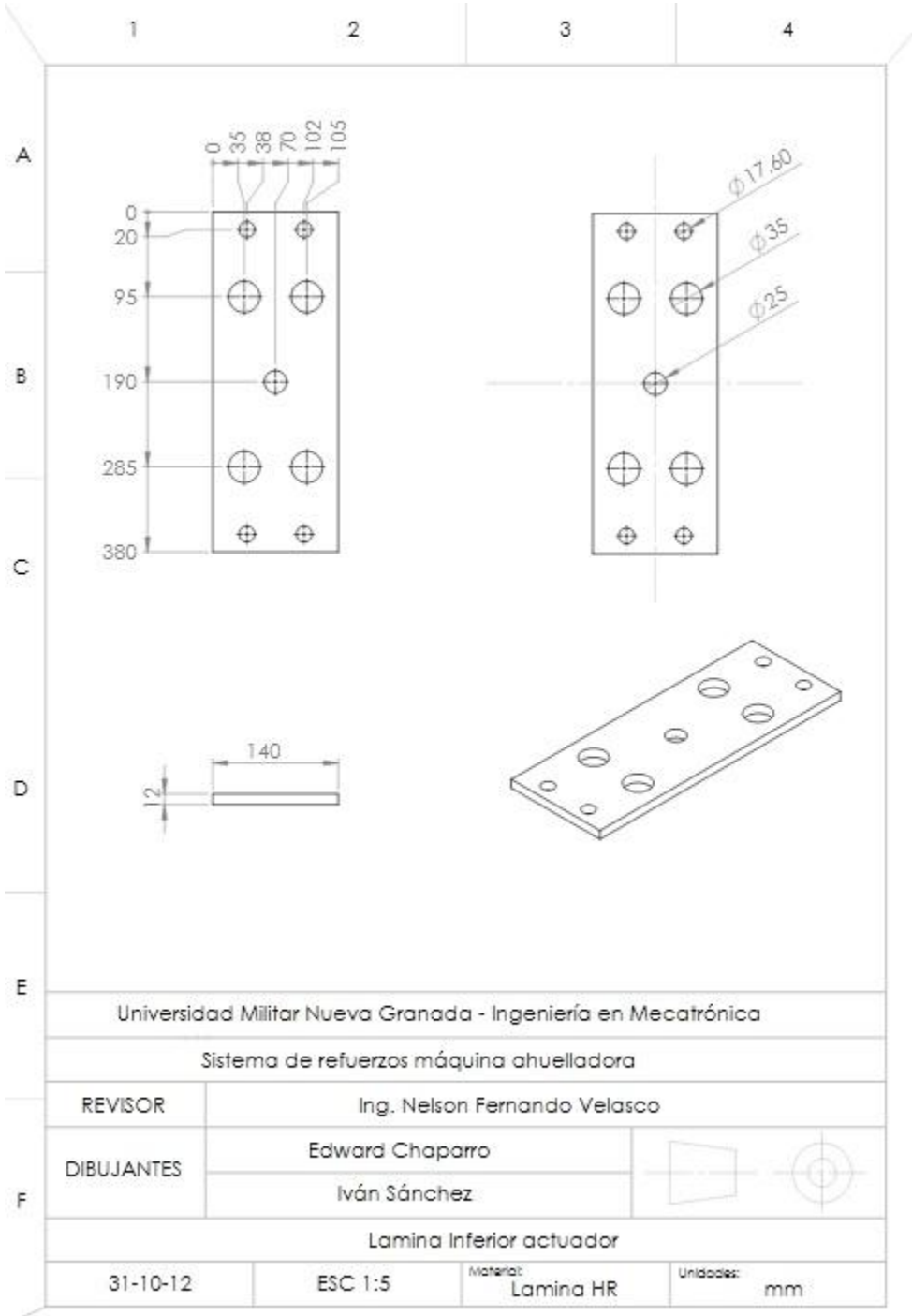
# ANEXO 5

Lamina superior actuador



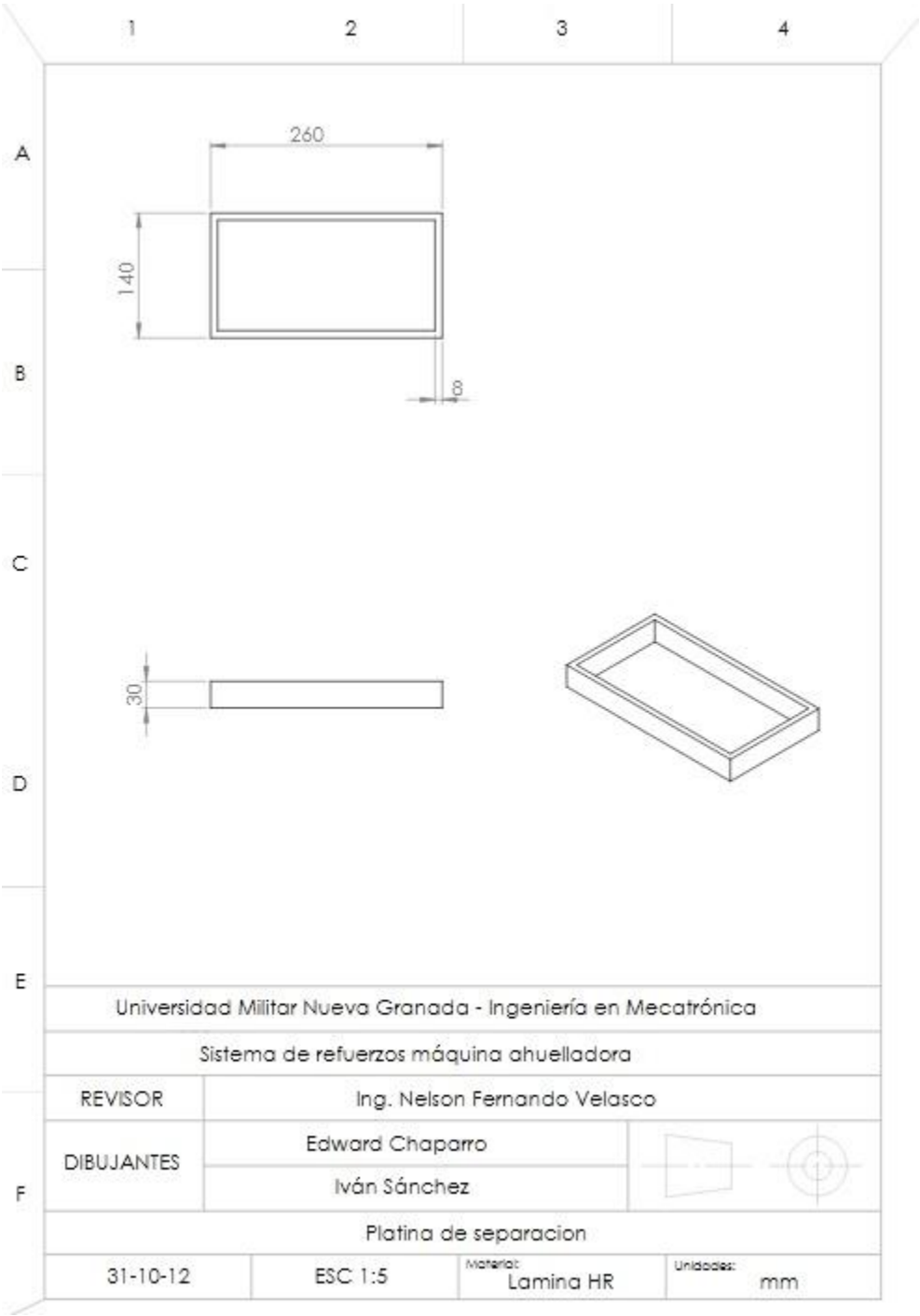
# ANEXO 6

Lamina inferior actuador



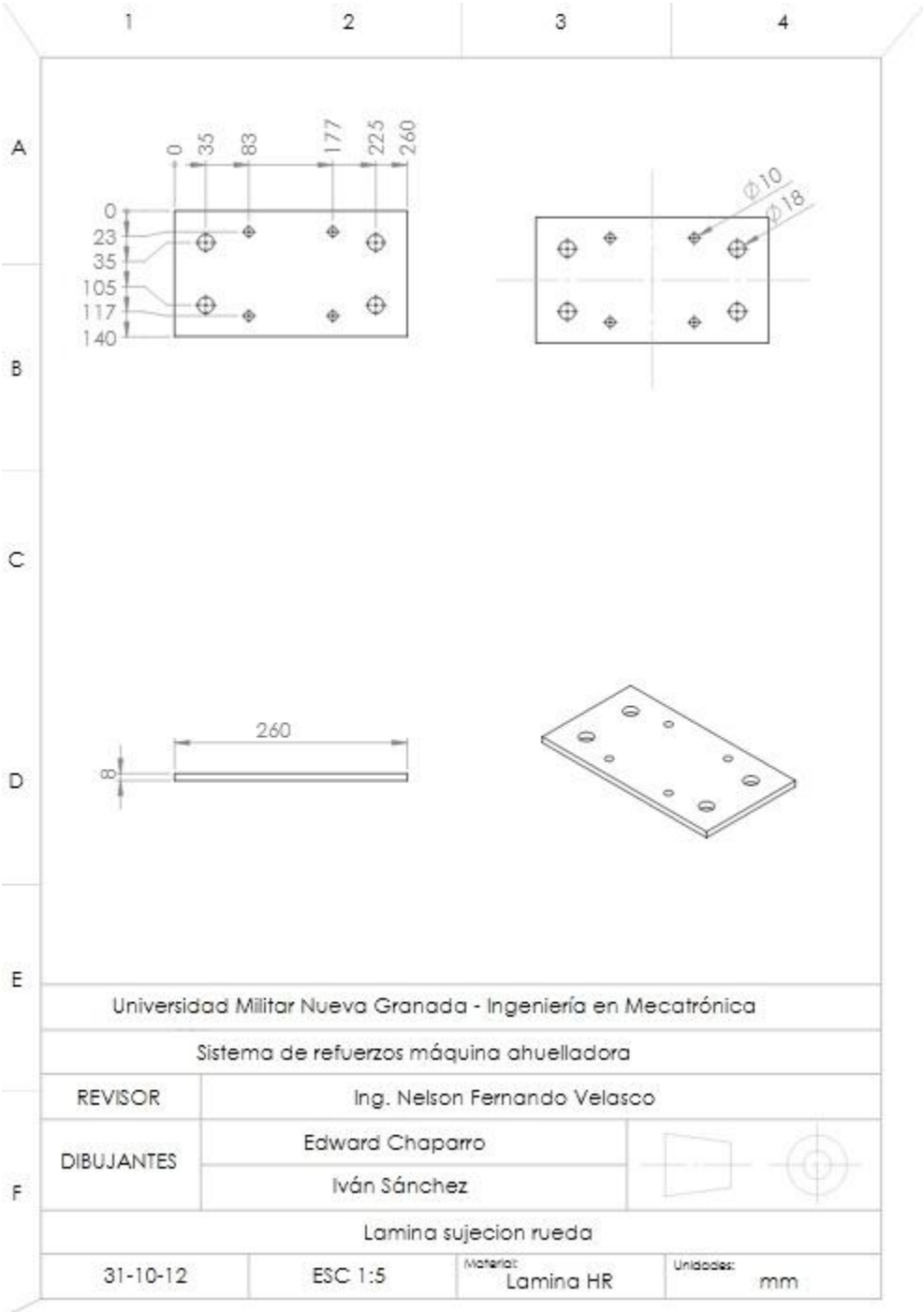
# ANEXO 7

Platina de separación.



# ANEXO 8

Platina sujecion rueda.



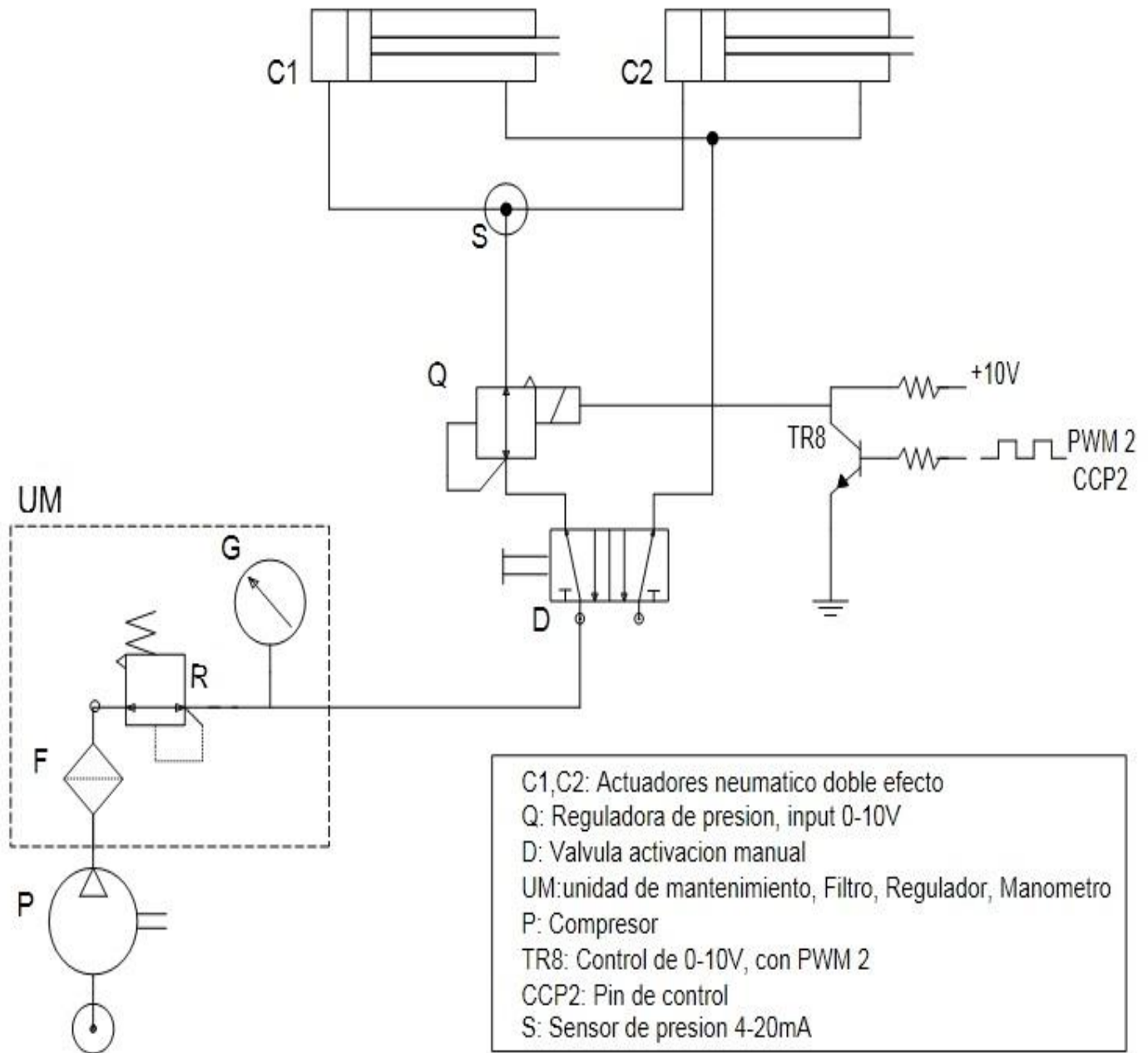
# ANEXO 9

Código de la fresa CNC

```
O0000 (AGUJEROS DE 35)
( DATE=DD-MM-YY - 01-08-12 TIME=HH:MM - 10:27 )
( MCX FILE - T )
( MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024 )
( T1 | | H1 | D2 | CONTROL COMP | TOOL DIA. - 15.86 )
N100 G21
N102 G0 G17 G40 G49 G80 G90
N104 T2 M6
N106 G0 G90 G54 X-99.812 Y-42.93 M3 S800
N108 G43 H1 Z10.
N110 G1 Z0. F80
N112 G42 D2 X-104.57
N114 G2 X-112.5 Y-35. I0. J7.93
N116 G1 X-112.401 Y-33.14 Z-.008
N118 X-112.105 Y-31.301 Z-.017
N120 X-111.614 Y-29.504 Z-.025
N122 X-110.936 Y-27.769 Z-.034
N124 X-110.077 Y-26.116 Z-.042
N126 X-109.047 Y-24.564 Z-.051
N128 X-107.859 Y-23.13 Z-.059
N130 X-106.524 Y-21.83 Z-.068
N132 X-105.059 Y-20.68 Z-.076
N134 X-103.48 Y-19.692 Z-.085
N136 X-101.804 Y-18.877 Z-.093
N138 X-100.052 Y-18.245 Z-.102
N140 X-98.243 Y-17.803 Z-.11
N142 X-96.396 Y-17.556 Z-.119
N144 X-94.534 Y-17.506 Z-.127
N5796 X83.476 Y21.83 Z-32.932
N5798 X82.141 Y23.13 Z-32.941
N5800 X80.953 Y24.564 Z-32.949
N5802 X79.923 Y26.116 Z-32.958
N5804 X79.064 Y27.769 Z-32.966
N5806 X78.386 Y29.504 Z-32.975
N5808 X77.895 Y31.301 Z-32.983
N5810 X77.599 Y33.14 Z-32.992
N5812 X77.5 Y35. Z-33.
N5814 G2 X95. Y52.5 I17.5 J0.
N5816 X112.5 Y35. I0. J-17.5
N5818 X95. Y17.5 I-17.5 J0.
N5820 X77.5 Y35. I0. J17.5
N5822 X85.43 Y42.93 I7.93 J0.
N5824 G1 G40 Y38.172
N5826 G0 Z10 M3 S2500
N5828 X90.188 Y-42.93
N5830 G1 Z0.
N5832 G42 D2 X85.43
N5834 G2 X77.5 Y-35. I0. J7.93
N5836 G1 X77.599 Y-33.14 Z-.008
N5838 X77.895 Y-31.301 Z-.017
N5840 X78.386 Y-29.504 Z-.025
N5842 X79.064 Y-27.769 Z-.034
N5844 X79.923 Y-26.116 Z-.042
N5846 X80.953 Y-24.564 Z-.051
N5848 X82.141 Y-23.13 Z-.059
N5850 X83.476 Y-21.83 Z-.068
N7890 X-109.047 Y-45.436 Z-32.949
N7892 X-110.077 Y-43.884 Z-32.958
N7894 X-110.936 Y-42.231 Z-32.966
N7896 X-111.614 Y-40.496 Z-32.975
N7898 X-112.105 Y-38.699 Z-32.983
N7900 X-112.401 Y-36.86 Z-32.992
N7902 X-112.5 Y-35. Z-33.
N7904 G2 X-95. Y-17.5 I17.5 J0.
N7906 X-77.5 Y-35. I0. J-17.5
N7908 X-95. Y-52.5 I-17.5 J0.
N7910 X-112.5 Y-35. I0. J17.5
N7912 X-104.57 Y-27.07 I7.93 J0.
N7916 G0 Z10.
N7918 X90.188 Y27.07
N7920 G1 Z0.
N7922 G42 D2 X85.43
N7924 G2 X77.5 Y35. I0. J7.93
N7926 G1 X77.599 Y36.86 Z-.008
N7928 X77.895 Y38.699 Z-.017
N7930 X78.386 Y40.496 Z-.025
N7932 X79.064 Y42.231 Z-.034
N7934 X79.923 Y43.884 Z-.042
N7936 X80.953 Y45.436 Z-.051
N7938 X82.141 Y46.87 Z-.059
N7940 X83.476 Y48.17 Z-.068
N7942 X84.941 Y49.32 Z-.076
N7944 X86.52 Y50.308 Z-.085
N1604 X-96.396 Y17.556 Z-32.881
N1606 X-98.243 Y17.803 Z-32.89
N1608 X-100.052 Y18.245 Z-32.898
N1610 X-101.804 Y18.877 Z-32.907
N1612 X-103.48 Y19.692 Z-32.915
N1614 X-105.059 Y20.68 Z-32.924
N1616 X-106.524 Y21.83 Z-32.932
N1618 X-107.859 Y23.13 Z-32.941
N1620 X-109.047 Y24.564 Z-32.949
N1622 X-110.077 Y26.116 Z-32.958
N1624 X-110.936 Y27.769 Z-32.966
N1626 X-111.614 Y29.504 Z-32.975
N1628 X-112.105 Y31.301 Z-32.983
N1630 X-112.401 Y33.14 Z-32.992
N1632 X-112.5 Y35. Z-33.
N1634 G2 X-95. Y52.5 I17.5 J0.
N1636 X-77.5 Y35. I0. J-17.5
N1638 X-95. Y17.5 I-17.5 J0.
N1640 X-112.5 Y35. I0. J17.5
N1642 X-104.57 Y42.93 I7.93 J0.
N1646 G0 Z10.
N1648 M5
N1650 G91 G28 Z0.
N1652 G28 X0. Y0. A0.
N1654 M30
%
```

# ANEXO 10

## Esquema neumático





# ANEXO 11

Tabla termocuplas tipo J

TERMOCUPLA milivolts	J									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-210	-8.096									
-200	-7.890	-7.912	-7.934	-7.955	-7.976	-7.996	-8.017	-8.037	-8.057	-8.076
-190	-7.659	-7.683	-7.707	-7.731	-7.755	-7.778	-7.801	-7.824	-7.846	-7.868
-180	-7.402	-7.429	-7.455	-7.482	-7.508	-7.533	-7.559	-7.584	-7.609	-7.634
-170	-7.122	-7.151	-7.180	-7.209	-7.237	-7.265	-7.293	-7.321	-7.348	-7.375
-160	-6.821	-6.852	-6.883	-6.914	-6.944	-6.974	-7.004	-7.034	-7.064	-7.093
-150	-6.499	-6.532	-6.565	-6.598	-6.630	-6.663	-6.695	-6.727	-6.758	-6.790
-140	-6.159	-6.194	-6.228	-6.263	-6.297	-6.331	-6.365	-6.399	-6.433	-6.466
-130	-5.801	-5.837	-5.874	-5.910	-5.946	-5.982	-6.018	-6.053	-6.089	-6.124
-120	-5.426	-5.464	-5.502	-5.540	-5.578	-5.615	-5.653	-5.690	-5.727	-5.764
-110	-5.036	-5.076	-5.115	-5.155	-5.194	-5.233	-5.272	-5.311	-5.349	-5.388
-100	-4.632	-4.673	-4.714	-4.755	-4.795	-4.836	-4.876	-4.916	-4.956	-4.996
-90	-4.215	-4.257	-4.299	-4.341	-4.383	-4.425	-4.467	-4.508	-4.550	-4.591
-80	-3.785	-3.829	-3.872	-3.915	-3.958	-4.001	-4.044	-4.087	-4.130	-4.172
-70	-3.344	-3.389	-3.433	-3.478	-3.522	-3.566	-3.610	-3.654	-3.698	-3.742
-60	-2.892	-2.938	-2.984	-3.029	-3.074	-3.120	-3.165	-3.210	-3.255	-3.299
-50	-2.431	-2.478	-2.524	-2.570	-2.617	-2.663	-2.709	-2.755	-2.801	-2.847
-40	-1.960	-2.008	-2.055	-2.102	-2.150	-2.197	-2.244	-2.291	-2.338	-2.384
-30	-1.481	-1.530	-1.578	-1.626	-1.674	-1.722	-1.770	-1.818	-1.865	-1.913
-20	-0.995	-1.044	-1.093	-1.141	-1.190	-1.239	-1.288	-1.336	-1.385	-1.433
-10	-0.501	-0.550	-0.600	-0.650	-0.699	-0.748	-0.798	-0.847	-0.896	-0.945
0	0.000	-0.050	-0.101	-0.151	-0.201	-0.251	-0.301	-0.351	-0.401	-0.451
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.813	0.865	0.916	0.967
20	1.019	1.070	1.122	1.174	1.225	1.277	1.329	1.381	1.432	1.484
30	1.536	1.588	1.640	1.693	1.745	1.797	1.849	1.901	1.954	2.006
40	2.058	2.111	2.163	2.216	2.268	2.321	2.374	2.426	2.479	2.532
50	2.585	2.638	2.691	2.743	2.796	2.849	2.902	2.956	3.009	3.062
60	3.115	3.168	3.221	3.275	3.328	3.381	3.435	3.488	3.542	3.595
70	3.649	3.702	3.756	3.809	3.863	3.917	3.971	4.024	4.078	4.132
80	4.186	4.239	4.293	4.347	4.401	4.455	4.509	4.563	4.617	4.671
90	4.725	4.780	4.834	4.888	4.942	4.996	5.050	5.105	5.159	5.213
100	5.268	5.322	5.376	5.431	5.485	5.540	5.594	5.649	5.703	5.758
110	5.812	5.867	5.921	5.976	6.031	6.085	6.140	6.195	6.249	6.304
120	6.359	6.414	6.468	6.523	6.578	6.633	6.688	6.742	6.797	6.852
130	6.907	6.962	7.017	7.072	7.127	7.182	7.237	7.292	7.347	7.402
140	7.457	7.512	7.567	7.622	7.677	7.732	7.787	7.843	7.898	7.953
150	8.008	8.063	8.118	8.174	8.229	8.284	8.339	8.394	8.450	8.505
160	8.560	8.616	8.671	8.726	8.781	8.837	8.892	8.947	9.003	9.058
170	9.113	9.169	9.224	9.279	9.335	9.390	9.446	9.501	9.556	9.612
180	9.667	9.723	9.778	9.834	9.889	9.944	10.000	10.055	10.111	10.166
190	10.222	10.277	10.333	10.388	10.444	10.499	10.555	10.610	10.666	10.721
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Nota Técnica 3, rev. b, <http://www.arian.cl>

ANEXO 12

Ficha técnica sensor de presión

ORDERING INFORMATION			
SERIES	300		
SWITCH FUNCTION	1 Single changeover contact, SPDT		
PROCESS CONNECTION	1 1/4" NPT Male		
ADJUSTABLE RANGES (Max. working pressure)	3/30	3 psig to 30 psig (870 psig)	150/1700 150 psig to 1,700 psig (5,000 psig)
	7/115	7 psig to 115 psig (870 psig)	150/2300 150 psig to 2,300 psig (5,000 psig)
	15/225	15 psig to 225 psig (870 psig)	300/2900 300 psig to 2,900 psig (5,000 psig)
	150/425	150 psig to 425 psig (5,000 psig)	300/3600 300 psig to 3,600 psig (5,000 psig)
	150/1150	150 psig to 1,150 psig (5,000 psig)	450/4600 450 psig to 4,600 psig (5,000 psig)
ELECTRICAL CONNECTIONS	1	3/6" Cable (connected to option 8)	8 Hirschmann (DIN EN 175301-803 form A)

Please consult your local NOSHOK Distributor or NOSHOK, Inc. for availability and delivery information.

EXAMPLE

300 - 1 - 2 - 15/225 - 8

Series ..... 300

Switch function ... Single changeover contact

Process connection ..... 1/4" NPT Male

Adjustable range ..... 15 psig to 225 psig

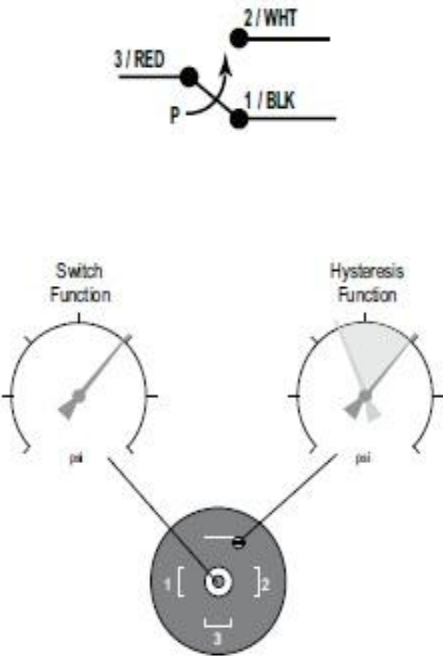
Electrical connection ..... Hirschmann

Additional Ordering Information  
Switch Set Point(s) (please specify)

Outline Dimensions



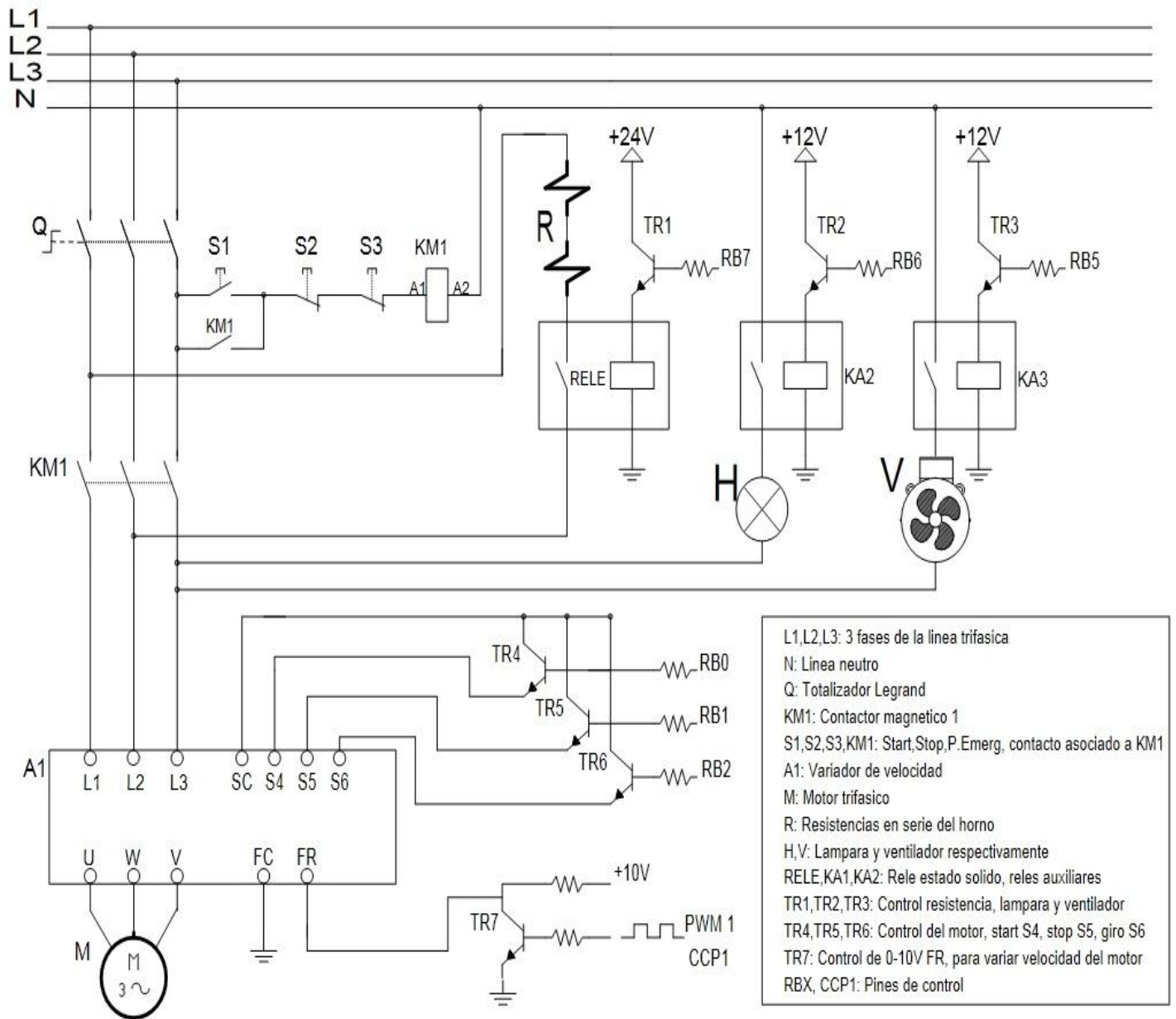
Switching Output Schematic





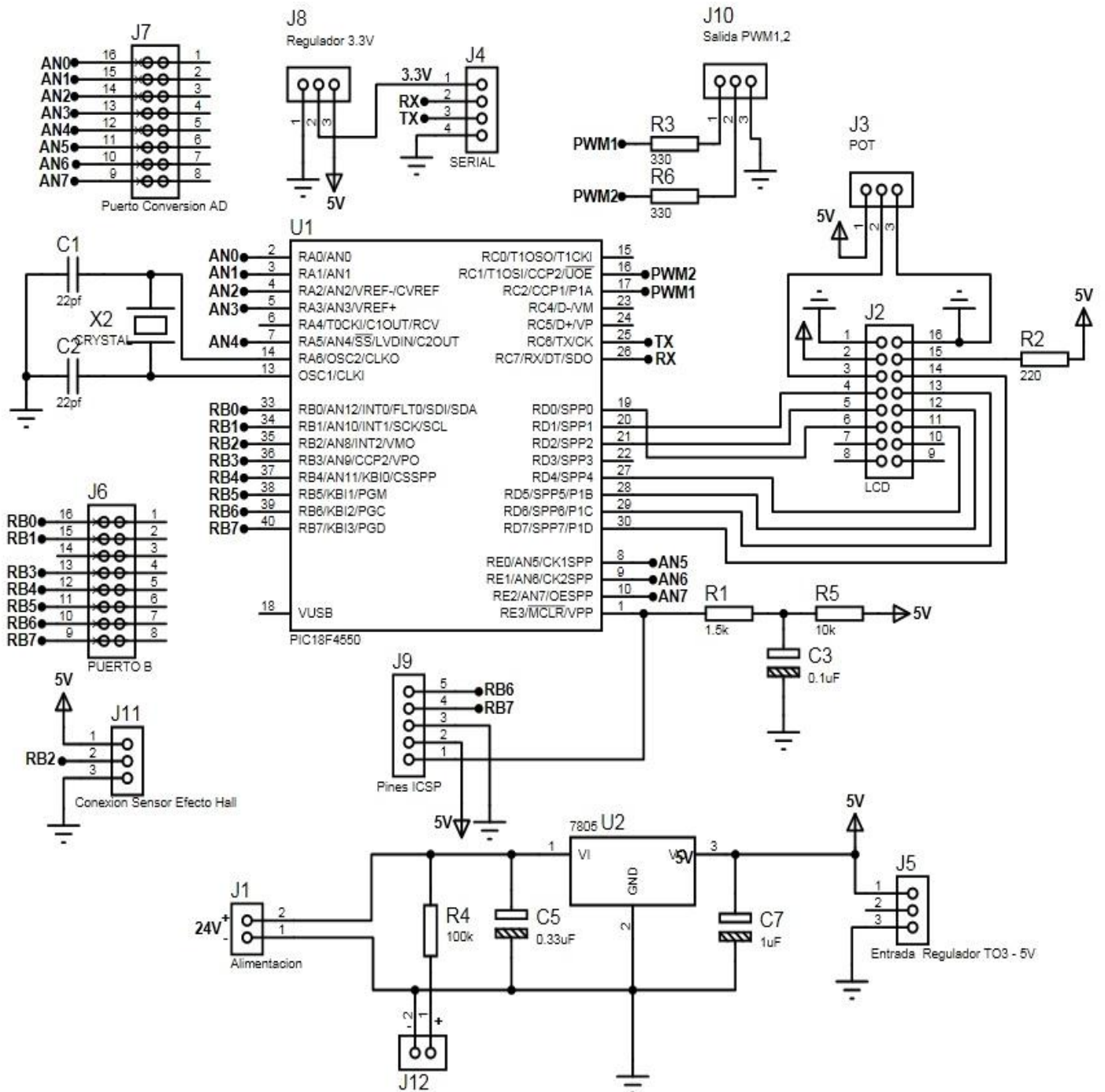
# ANEXO 13

## Esquema eléctrico

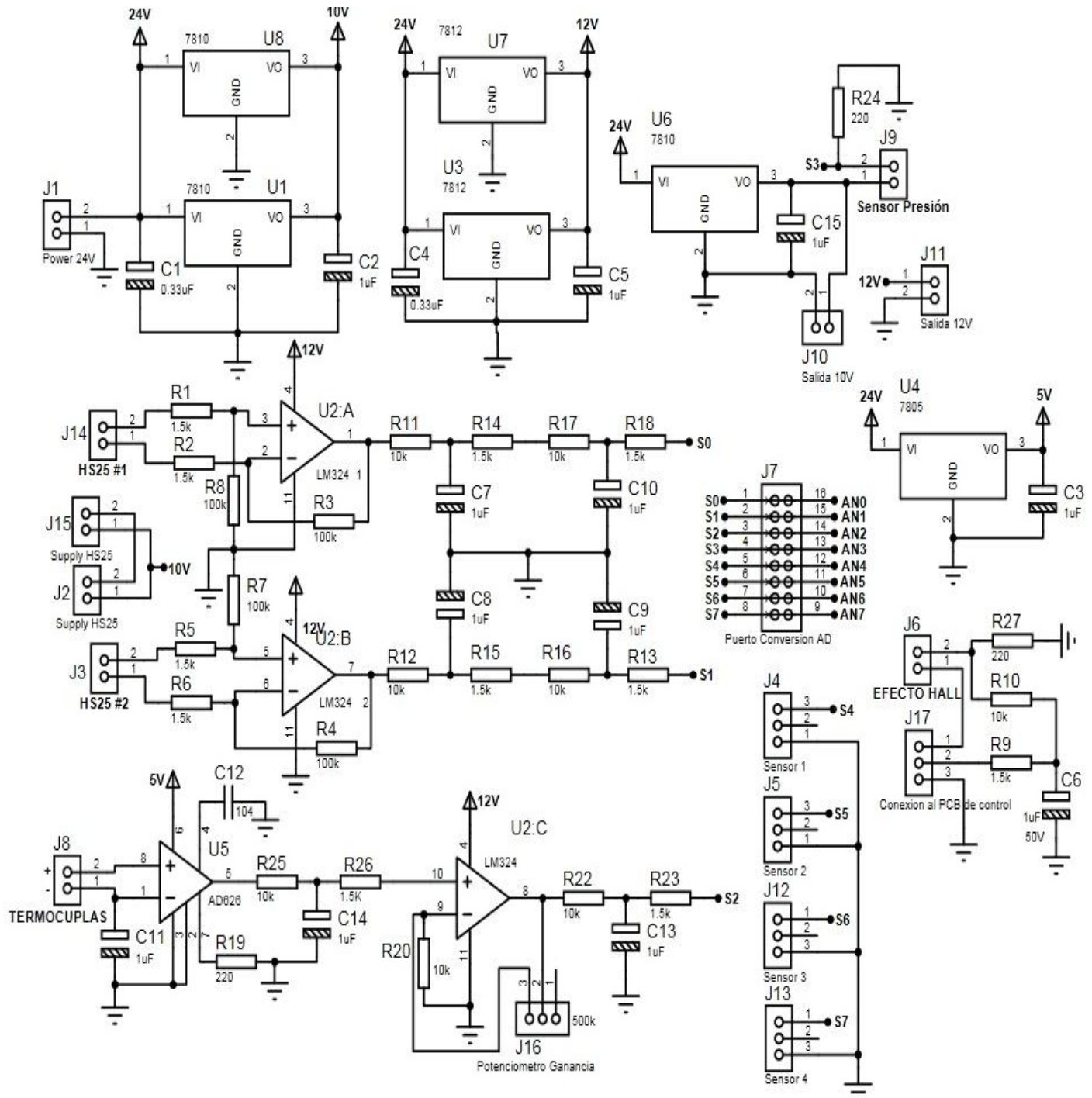


# ANEXO 14

## Esquema circuito de control

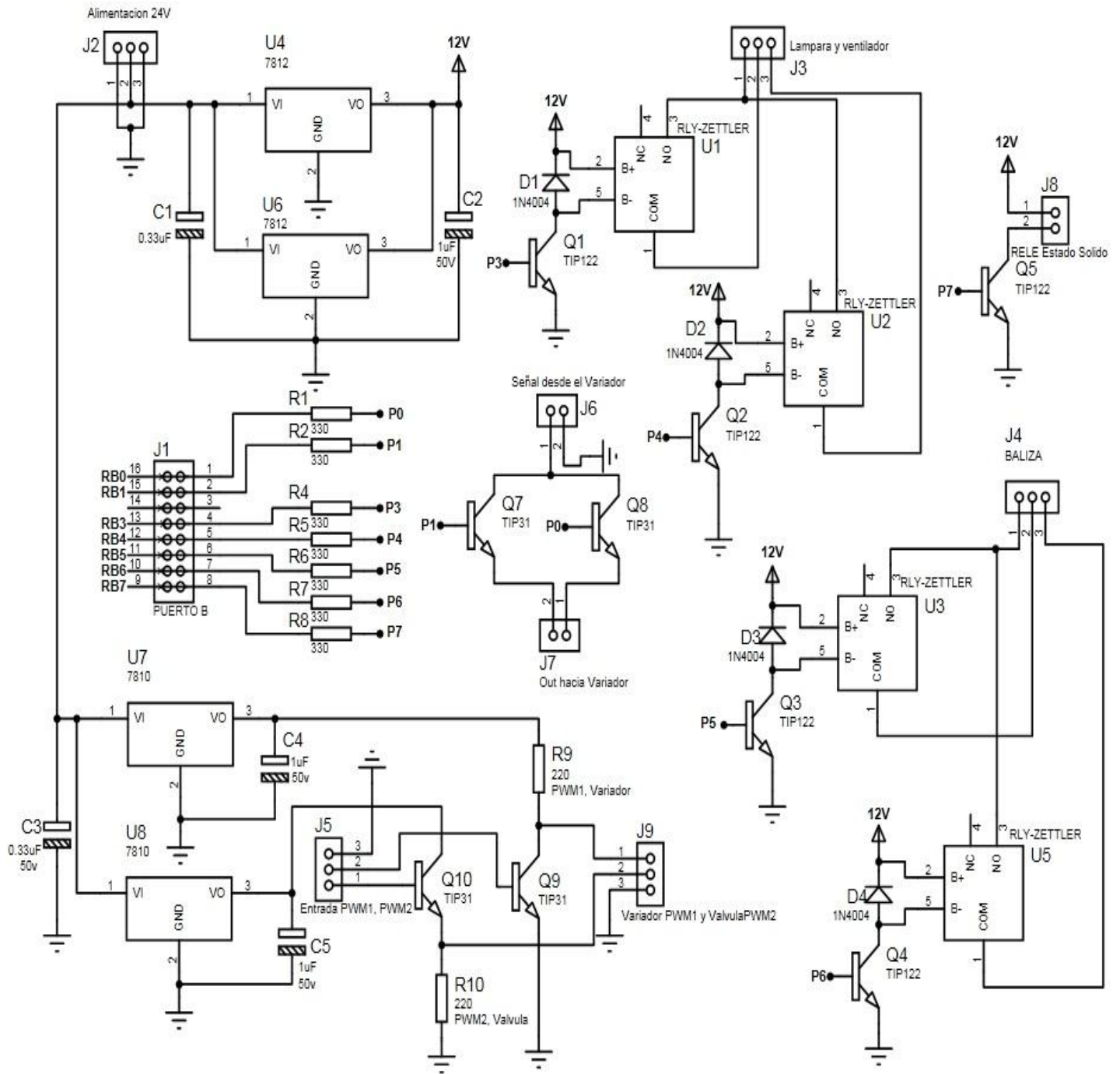


### Esquema circuito de amplificación y acondicionamiento



# ANEXO 16

## Esquema circuito de potencia



# ANEXO 17

Tarjeta usada para la comunicación serial por protocolo RS232



Imagen 1: Tarjeta FT232.

## DESCRIPCION

Tarjeta para el FT232RL, circuito integrado conversor de interfaz serial USB-UART. Se alimenta directamente del puerto USB, y su pin VCCIO puede ser puesto a 3.3V por medio del solder-jumper (SJ-1, ubicado en la cara superior entre el FT232 y la regleta de 5 pines). La mayoría de los pines del integrado vienen conectados a las regletas laterales para que el integrado pueda usarse directamente sobre un protoboard. Utiliza un puerto Mini USB (Mini-B) para conectarse al PC, aquí puede usar el Cable Mini USB. La tarjeta posee dos regletas de 9 pines con espacios de 0.1" (2.54mm) entre pines y 0.7" (17.78mm) de espacio entre ellas. El terminal de salida de 3.3v puede proveer hasta 50mA para lógica externa de ser necesario. Dimensiones de la tarjeta: 32mm x 23mm.



# Anexo 18

## Código PIC, doble columna.

```
//Proyecto Máquina Ahuelladora
//Iván Sánchez - Edward Chaparro
#include <18f4550.h>
#define adc=10 //conversion a 10bits
#define FUSES XT, NOWDT, NOPROTECT, NOLVP, PUT, BROWNOUT ///Fusibles
#define use delay(clock=4000000) /// Cristal de 4Mhz
#include <lcd.c> ///Libreria de la LCD 16x2
#define use rs232(baud=9600, xmit=pin_c6, rcv=pin_c7, bits=8, parity=N)
#include <stdlib.h>
#define BYTE TRISC=0x86

int valor1, fun=0;
int x, y, z, pre, m=55, x2;
int t16 cont=79, n=0;
int t16 cont8=0;
int contador=0, rpm2=0;
//Variables control Temperatura
float t1, t2, tinf=0, tsup=0;
int tout=0;
//Variables control PI Presion
float p1, p2;
int t16 ip=0;
float ep[3]={0,0,0};
float Kpp=0.48, Kip=0.17;
int t16 kpp2, kip2;
float CPIp[2]={0,0};
//Variables control PI Ciclos
int t16 ci=0, cil=0, ci2=0, tcil=0, tci2=0, vt=0, c22=20, ciclos=20;
int ppm=0;
float c1=0, c3=0;
int t16 ic=0;
float ec[3]={0,0,0};
float Kpc=0.02, Kic=0.06;
int t16 kpc2, kic2;
float CPIc[2]={0,0};
//Variables de los parametros
int presion=4, temperatura=5;
//Variables para Ventilador, Baliza y horno
int venti=0, lamp=0;
int mv, mr, mven, mlam;
//Definicion de Funciones
void conv(void);
void envio(void);
//Interrupcion de recepcion Serial
#define RDA
void RDA_isr(void){
    valor1=getc(); /// Dato Recibido
}

//Desborda. cada 0,5s el valor TIMER1=3036=0x0BDC PRE=8
#define TIMER1
void TIMER1_isr(void)
{
    contador++;

    if(contador==60) ///cuenta hasta 30s
    {
        rpm2=(ci2*2); /// X2 para obtener el valor en lmin
        delay_ms(150);
        ci2=0;
        contador=0;
    }
    if(x<125 && x>60){n=n+1;}
    set_timer1(0x0BDC); /// Carga TIMER1
}

//tiempo de muestreo de 25ms
#define timer0
void timer0(void){
    if(cil == 1){tcil=tcil+1; set_timer0(41);}
    if(cil == 0){tci2=tci2+1; set_timer0(41);}
}

//Interrupcion externa por RB2
#define EXT2
void EXT2_isr(void){
    ci=ci+1; ci2=ci2+1;
    cil=ci%2; delay_ms(2);
    if(cil == 1){vt=tci2; tci1=0; set_timer0(41);} //61
    if(cil == 0){vt=tci1; tci2=0; set_timer0(41);} //61
}

void parametros_prueba(void){
    if(valor1>=24 && valor1<=60){temperatura=valor1;}
    if(valor1>=61 && valor1<=111){ciclos=(valor1-53);}
    if(valor1>=112 && valor1<=190){presion=(valor1-110);}
}

void control_ci(void){
    c1=((ciclos)-63.461)/(-0.0701); //Valor de ciclos, en fun. de PWM
    if(vt>=11 && vt<18){c22=(((-3.6327)*vt)+(107.02));}
    if(vt>=18 && vt<32){c22=(((-1.3987)*vt)+(67.564));}
    if(vt>=32 && vt<58){c22=((vt*(-0.4277))+(37.564));}
    if(vt>=58 && vt<=130){c22=((vt*(-0.1037))+(19.453));}
    c3=((c22)-63.461)/(-0.0701); //Valor de ciclos, en fun. de PWM
    ec[2]=ec[1];
    ec[1]=ec[0];
    ec[0]=c1-c3;
    CPIc[1]=CPIc[0];
    CPIc[0]=(ec[0]*(Kpc+Kic))-(ec[1]*Kpc)+CPIc[1];
    ic=CPIc[0];
    if(ic>800){ic=800;} //Restringir el rango del ciclo util
    if(ic<=0){ic=0;} //Restringir el rango del ciclo util
    set_pwm1_duty(ic); //Se varia el valor del ciclo util del PWM1
}

void control_temp(void){
    //La variacion 40mV/C
    t1=((temperatura+12.864)/24.726);
    t2=z*0.02;
    tinf=(t1-0.01); //t1-0.1°C
    tsup=(t1+0.01); //t1+0.1°C
    if(t2<=tinf){output_high(pin_b7);} //Enciende Resistencias
    if(t2>=tsup){output_low(pin_b7);} //Apaga Resistencias
    tout=((0.4945*z)-12.864);
}

void control_presion(void){
    //Y=mx+b del sensor, m=29,069; b=-24,99 ; P=(29,069*Pre)-24,99
    p1=(presion+24.99)/29.069; // Aplicando la ecuacion anterior
    //obtenemos el valor de P en funcion al Vout del sensor
    p2=pre*0.02; //Sensor entre 0.94V y 4.34V
    ep[2]=ep[1];
    ep[1]=ep[0];

    CPIp[1]=CPIp[0];
    CPIp[0]=(ep[0]*(Kpp+Kip))-(ep[1]*Kpp)+CPIp[1];
    ip=((CPIp[0])+0.4674)/0.0047; //Salida cont. en valor de PWM
    if(ip>920){ip=920;} //Restringir el rango del ciclo util
    if(ip<260){ip=260;} //Restringir el rango del ciclo util
    set_pwm2_duty(ip); //Se varia el valor del ciclo util del PWM2
}

void funcion_principal(void)
{
    if(valor1==1){ /// Inicia Variador
        output_high(pin_b0);
        output_high(pin_b1);
        delay_ms(600);
        output_low(pin_b0);
        valor1=0; fun=1;
        output_high(pin_b6);
        output_high(pin_b5);
    }
    if(valor1==2){ /// Para Variador
        output_low(pin_b1);
        delay_ms(5);
        valor1=0; fun=0; c22=20; ciclos=20;
        output_low(pin_b6);
        output_high(pin_b5);
    }
    cont8=(cont*0.28);
    if(valor1==12){ /// ON/OFF Lampara
        lamp=lamp+1; mlam=lamp%2; delay_ms(1);
        if(mlam == 0){output_high(pin_b4);}
        if(mlam == 1){output_low(pin_b4);}
        valor1=0;
    }
    if(valor1==11){ /// ON/OFF el ventilador
        venti=venti+1; mven=venti%2; delay_ms(1);
        if(mven == 0){output_high(pin_b3);}
        if(mven == 1){output_low(pin_b3);}
        valor1=0;
    }
}
```

```

void lcdx(void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    printf(lcd_putc, "T:%u",tout);

    lcd_gotoxy(10,1);
    printf(lcd_putc, "P:%3lu",ip);

    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc, "PPM:%u",ppm);
}

void main()
{
    bit_clear(TRISC,2);//CCP1 RC2 como salida PWM
    bit_clear(TRISC,1);//CCP2 RC1 como salida PWM

    set_tris_B(0x04);//b= 0000 0100 in b2, sensor efecto hall
    set_tris_a(0xFF);

    //////////// PWM RC2 CCP1
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,224,1); //PR2=224, T_pwm=225us
    setup_ccp1(CCP_PWM); //CCP1 en modo PWM
    setup_ccp2(CCP_PWM); //CCP2 en modo PWM

    //////////// TIMER 1
    setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_8);//reloj int y div8
    enable_interrupts(INT_TIMER1);//activar interrup en timer0
    enable_interrupts(GLOBAL); // permitir interrupciones
    ////////////TIMER 0
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL | RTCC_DIV_256 | RTCC_8_BIT);
    enable_interrupts(INT_TIMER0);//activar interrup en timer0
    enable_interrupts(GLOBAL); // permitir interrupciones
    //////////// ADC
    setup_adc_ports(AN0_TO_AN3|VSS_VDD);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    ////////////
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(INT_EXT2);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    //////////// LCD
    lcd_init();
    lcd_gotoxy(1,1);
    printf(lcd_putc,"Proyecto 3 Grado");
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"Mag. AhuelliadGora");
    delay_ms(1000);
    ////////////
    lcd_putc("\n");
    output_high(pin_b5);
    output_low(pin_b6);
    output_high(pin_b3);
    while (true){
        lcdx();
        funcion_principal();
        control_presion();
        control_ci();
        control_temp();
        conv();
        envio();
        if(valor1>=25 && valor1<=60){temperatura=valor1;}
        if(valor1>=61 && valor1<=111){ciclos=(valor1-51);}
        if(valor1>=112 && valor1<=190){presion=(valor1-110);}
        ppm=(c22-0.075)/0.235;
    }
}

void conv(void) {
    set_adc_channel(0); //Hab. canal0 hs25 #1
    delay_ms(50);
    x = (read_adc())/4.1; //Conv.0-254
    if(x>190){m=m - (n/10); x2=m;}
    if(x>55 && x<190){x2=x;m=55;n=0;}
    if(x<44){x2=x;m=55;n=0;}
    set_adc_channel(1); //Hab. canal1 hs25 #2
    delay_ms(50);
    y = (read_adc())/4.1; //Conv.0-254
    set_adc_channel(2); //Hab.n canal2 Termocuplas
    delay_ms(50);
    z = (read_adc())/4.1; //Conv. de 0-254
    set_adc_channel(3); //Hab. canal3 sen. presion
    delay_ms(50);
    pre = read_adc()/4.1; //Conv. 0-254
}

void envio (void)
{
    putc(x2); //Envio valor HS25 #1
    delay_ms(10);
    putc(y); //Envio valor HS25 #2
    delay_ms(10);
    putc(tout); //Envio valor termocuplas
    delay_ms(10);
    putc(pre); //Envio valor de presion
    delay_ms(10);
    putc(ppm); //Envio valor dePPM
    delay_ms(10);
}

```

### Diagrama de bloques interfaz en LabView

